



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

—

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE

—

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE
IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

PROBLEMI DI COMPATIBILITÀ
GRANULOMETRICA ALL'INTERFACCIA
DELL'AMMASSO RIFIUTI IN UNA
DISCARICA PER RIFIUTI SOLIDI URBANI

RELATORE: CH.MO PROF. ING. GIAMPAOLO CORTELLAZZO

CORRELATORE: DOTT. ING. STEFANO BUSANA

LAUREANDO: JACOPO ZANFORLIN

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED
AMBIENTALE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE
IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

PROBLEMI DI COMPATIBILITÀ
GRANULOMETRICA ALL'INTERFACCIA
DELL'AMMASSO RIFIUTI IN UNA
DISCARICA PER RIFIUTI SOLIDI URBANI

RELATORE: CH.MO PROF. ING. GIAMPAOLO CORTELLAZZO

CORRELATORE: DOTT. ING. STEFANO BUSANA

LAUREANDO: JACOPO ZANFORLIN

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

Sommario

Nella progettazione di una discarica per rifiuti solidi urbani è di primaria importanza la corretta realizzazione degli strati a contatto con il rifiuto. La compatibilità granulometrica tra questi e il rifiuto, sebbene solo accennata nella normativa, è essenziale affinché non si verifichino fenomeni di erosione o di intasamento che possono in breve tempo comprometterne l'efficacia, con conseguenti ripercussioni sulla salvaguardia dell'ambiente e della salute pubblica, nonché aggravii dei costi di gestione. In tale ambito lo studio della compatibilità granulometrica è reso più complesso dalla natura eterogenea del rifiuto e dall'eventuale necessità di assicurare negli strati che costituiscono l'interfaccia proprietà idrauliche idonee al drenaggio del biogas e del percolato.

L'obiettivo di questa tesi è quello di giungere alla definizione di alcune proposte progettuali che possano fornire un utile contributo al dimensionamento, in una discarica per rifiuti solidi urbani, dell'interfaccia in copertura tra barriera minerale e rifiuto e di quella al fondo tra rifiuto e barriera di confinamento.

Nel corso della tesi si discuteranno dapprima le principali teorie per la verifica della compatibilità granulometrica tra strati di differente granulometria e per la valutazione della loro stabilità interna, successivamente, dopo aver definito un modello per l'interpretazione granulometrica del rifiuto, si analizzeranno le dinamiche che avvengono tra il rifiuto e gli strati a contatto con questo, confrontando differenti soluzioni progettuali e valutando quali tra queste meglio si prestino all'impiego in una discarica per rifiuti solidi urbani.

Abstract

The correct realisation of the layers in contact with the waste is a core issue in the design of a municipal solid waste landfill. The particle size distribution compatibility between these layers and the waste is fundamental to avoid erosion or clogging phenomena that could compromise their effectiveness in the short term. This phenomena could lead to consequences for the protection of the environment and for public health, as well as to an increase in the landfill's operating costs. In that context the particle size distribution compatibility analyses are more complex due to the heterogeneous nature of the waste and to the possible need to ensure an efficient drainage of biogas and leachate in the layers making up the interface.

The purpose of this thesis is to propose design principles that could help the sizing and characterization of the interfaces with the waste in a municipal solid waste landfill.

The thesis will initially discuss the main theories regarding the particle size distribution compatibility analyses of different materials. After having defined a model that describes the particle size distribution of the waste, the analysis will turn to the phenomena occurring between the waste and the layers in contact with. A comparison will be drawn between different possibilities for the realisation of the interfaces, evaluating the most suitable to be used in a municipal solid waste landfill.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	I filtri nell'ingegneria geotecnica	1
1.2	Filtri granulari e filtri in geotessile	2
1.3	Stati limite ultimi nei filtri	5
2	Compatibilità granulometrica	7
2.1	Metodi empirici	8
2.1.1	Metodo di <i>Terzaghi</i>	9
2.1.2	Metodo di <i>Leatherwood</i> e <i>Peterson</i>	9
2.1.3	Metodo dello <i>U.S.A.C.E.</i>	10
2.1.4	Metodo di <i>Thanikachalam</i> e <i>Sakthivadivel</i>	12
2.2	Metodi geometrico-probabilistici	13
2.2.1	Metodo di <i>Musso</i> e <i>Federico</i>	13
3	Stabilità interna	23
3.1	Metodi empirici	24
3.1.1	Metodo di <i>Kezdi</i>	24
3.1.2	Metodo di <i>Kenney</i> e <i>Lau</i>	25
3.1.3	Metodo di <i>Burenkova</i>	28
4	Moti di filtrazione nelle discariche	31
4.1	Tipologie di discarica	31
4.2	Problemi connessi alla filtrazione	35

4.3	Uso di rifiuto selezionato come filtro	36
4.4	Modellazione geotecnica dei rifiuti	38
4.4.1	Composizione	38
4.4.2	Distribuzione granulometrica	40
4.5	Caratteristiche dello strato di barriera minerale	41
5	Progettazione del pacchetto di copertura	45
5.1	Trasmissività richiesta per il drenaggio del biogas	46
5.2	Confronto tra le possibili soluzioni progettuali	49
5.2.1	Barriera minerale a contatto diretto con il rifiuto	52
5.2.2	Singolo strato di materiale granulare tra barriera minerale e rifiuto	54
5.2.3	Doppio strato di materiale granulare tra barriera minerale e rifiuto	60
5.2.4	Triplo strato di materiale granulare tra barriera minerale e rifiuto	66
5.2.5	Geotessile all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto	72
5.2.6	Geotessile e singolo strato di materiale granulare tra barriera minerale e rifiuto	73
6	Progettazione dello strato filtrante di fondo	75
6.1	Proprietà idrauliche richieste	76
6.2	Confronto tra le possibili soluzioni progettuali	79
6.2.1	Singolo strato di materiale granulare tra rifiuto e barriera di confinamento	80
6.2.2	Doppio strato di materiale granulare tra rifiuto e barriera di confinamento	85
7	Riflessioni e conclusioni	95
A	Programmi di calcolo	103
A.1	Implementazione del metodo di <i>Musso e Federico</i>	103

<i>INDICE</i>	xi
A.2 Implementazione del metodo di <i>Kezdi</i>	124
A.3 Implementazione del metodo di <i>Kenney</i> e <i>Lau</i>	131
Bibliografia	135

Capitolo 1

Introduzione

1.1 I filtri nell'ingegneria geotecnica

Nel corso di questa tesi si intenderanno come filtri quei dispositivi che garantiscono la protezione di un materiale dai fenomeni di erosione. Il flusso dell'acqua o di altri liquidi può trascinare con sé le particelle solide con conseguente indebolimento della struttura del materiale. In sistemi multistrato inoltre le particelle di un materiale migrando verso gli strati sottostanti possono portare all'occlusione di questi ultimi modificandone le proprietà idrauliche. Il compito del filtro in ambito geotecnico (Fell *et al.*, 2005) è dunque quello di prevenire l'asportazione di particelle solide dal terreno da proteggere e al contempo consentire il deflusso del fluido evitando la formazione di sovrappressioni neutrali.

I filtri, e di conseguenza i relativi criteri di progettazione, trovano vasto uso in numerosi campi dell'ingegneria civile, sono per esempio utili nella progettazione del sottofondo di opere stradali dove sono adottati allo scopo di mantenere la struttura del terreno anche in presenza di infiltrazioni d'acqua, prevenendo quindi il depauperamento dalle frazioni più fini della granulometria e la conseguente formazione di vuoti al di sotto del manto stradale che potrebbero portare alla rottura dell'opera.

Un altro settore nel quale i filtri rivestono un ruolo di fondamentale importanza, a causa della gravità delle conseguenze che una non corretta progettazione potrebbe comportare, è quello delle costruzioni idrauliche. In particolare nella realizzazione di argini e di dighe a gravità, dove un'adeguata progettazione è necessaria per evitare l'insorgere di sifonamento da una parte e per garantire una permeabilità sufficiente ad evitare la formazione di pressioni eccessive dall'altra (Da Deppo *et al.*, 2004).

Non da ultimo i filtri trovano largo impiego in associazione ad opere di drenaggio dove, prevenendo i fenomeni di erosione e di successivo trasporto delle frazioni fini del terreno, evitano l'intasamento dei dreni e garantiscono quindi il loro funzionamento nel tempo. In tale ambito le applicazioni sono le più disparate dalle opere di sostegno alla stabilizzazione dei versanti alla progettazione delle discariche per rifiuti. Proprio quest'ultima applicazione sarà trattata maggiormente nel dettaglio nel corso della tesi a partire dal capitolo 4, dove i criteri studiati saranno applicati nel tentativo di fornire delle soluzioni progettuali per la corretta realizzazione dell'interfaccia tra pacchetto di copertura e rifiuto e dell'interfaccia tra rifiuto e strato drenante di fondo.

1.2 Filtri granulari e filtri in geotessile

Nella pratica ingegneristica corrente la funzione filtrante è essenzialmente esercitata da due tipologie di filtro, usate singolarmente o in combinazione:

- filtri granulari;
- filtri in geotessile.

I filtri granulari, il cui impiego è supportato da una lunga esperienza, sono costituiti da uno o più strati di materiale di natura granulare (tipicamente sabbia o ghiaia sabbiosa ben graduata) selezionato secondo una curva granulometrica che assicuri la ritenzione delle particelle del terreno di base e una

sufficiente permeabilità. L'eventualità di disporre più strati di materiale granulare può rendersi necessaria quando si abbia una differenza particolarmente marcata tra le caratteristiche dello strato drenante e del terreno da proteggere. In tal caso, per consentire un agevole deflusso dell'acqua ed evitare che si verifichino incrementi della pressione neutrale localizzati, la permeabilità dei filtri multistrato deve aumentare progressivamente nella direzione del flusso (de Graauw *et al.*, 1984).

In un filtro granulare correttamente progettato il funzionamento, con flusso stazionario e perpendicolare all'interfaccia, è legato all'instaurarsi di un *effetto arco* all'interfaccia tra filtro e materiale di base. Alcune particelle del materiale di base si aggregano in corrispondenza delle porosità del filtro riuscendo a trattenere le restanti particelle del materiale da proteggere. La formazione di tale meccanismo di effetto arco è possibile solo nel caso in cui non sia eccessivo il rapporto fra il diametro dei grani costituenti il filtro e il diametro dei grani del terreno di base. In caso di flussi non stazionari, e in particolare con deflussi bidirezionali o ciclici, l'effetto arco è potenzialmente instabile e conseguentemente può essere compromesso il funzionamento del filtro (de Graauw *et al.*, 1984).

L'uso di materiali coesivi nella composizione del filtro granulare può comportare la formazione di fessure, come conseguenza per esempio di assestamenti del suolo di fondazione (problema particolarmente rilevante nelle discariche), che diventano delle vie preferenziali per il deflusso dell'acqua attraverso cui si realizza l'erosione del terreno da proteggere. Per tale ragione è opportuno l'impiego di materiali privi di coesione interna e quindi caratterizzati da autocicatizzazione.

L'uso di un filtro granulare costituito da un unico strato di materiale che presenti una curva granulometria molto estesa, seppur ben graduata, può presentare degli inconvenienti legati alla bassa permeabilità, al manifestarsi di fenomeni di segregazione nella messa in opera e al possibile sviluppo di coesione attribuibile alla presenza di frazioni granulometriche eccessivamente

fini (Arulanandan e Perry, 1983).

Negli ultimi decenni l'innovazione tecnologica ha fatto sì che si siano sviluppati sempre più i cosiddetti filtri in geotessile. Si tratta di tessuti sintetici composti da fibre il cui intreccio determina una struttura costituita da un insieme di aperture. Nel caso di flussi monodirezionali (quali sono quelli indagati in questa tesi) l'effetto filtrante non si realizza esclusivamente nell'attraversamento del geotessile (John, 1987), ma piuttosto la presenza di questo fa sì che, nelle sue immediate vicinanze, analogamente a quanto descritto per i filtri granulari, il materiale base si ridistribuisca attraverso la perdita di una parte di frazione fine, così che le restanti particelle possano dar luogo a degli effetti arco in corrispondenza delle aperture del geotessile, riuscendo a trattenere in tal modo particelle di dimensioni anche sensibilmente inferiori a quelle delle aperture stesse (figura 1.1).

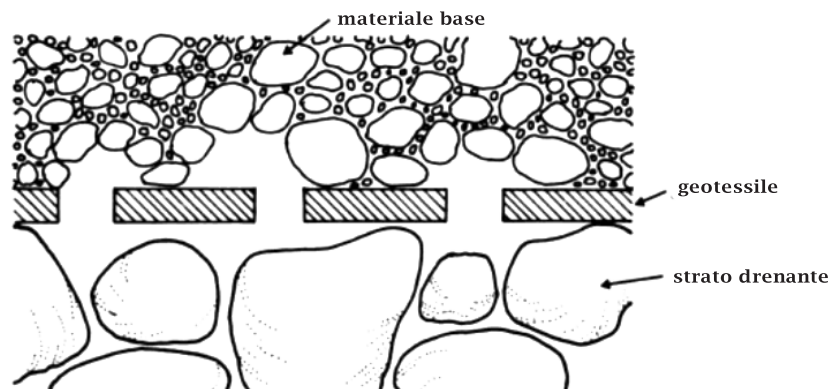


Figura 1.1: Effetti arco in corrispondenza delle aperture del geotessile (John, 1987).

Fra i vantaggi dei filtri in geotessile possono enunciarsi l'ingombro ridotto e l'elevata qualità e rispondenza alle direttive di progetto dovute al processo di realizzazione di natura industriale. Dall'altra parte i filtri granulari possono vantare una buona durabilità a lungo termine che invece non è spesso garantita per i filtri in geotessile non essendo disponibili dati a riguardo poiché la loro introduzione è ancora troppo recente. Pertanto negli impieghi più importanti, dove le conseguenze di una rottura possono esse-

re particolarmente gravi, è preponderante ancora oggi l'utilizzo dei filtri di natura granulare.

Per quanto riguarda i costi i filtri in geotessile sono abbastanza economici, tuttavia, nel caso di estensioni elevate e di disponibilità del materiale in loco, i filtri granulari risultano spesso più vantaggiosi quando la loro posa non richieda lavorazioni complesse.

1.3 Stati limite ultimi nei filtri

La rottura del sistema filtrante di natura granulare può avvenire per il raggiungimento dello stato limite di erosione o dello stato limite di intasamento.

- Lo stato limite di erosione si verifica quando la granulometria del terreno di base viene depauperata dalle frazioni più fini che vengono trasportate dal flusso d'acqua e non sono trattenute dal filtro. La progressiva evoluzione di tale fenomeno può portare alla formazione di una rete di canalicoli attraverso cui il fluido scorre senza incontrare resistenza, trasportando particelle di terreno di dimensioni via via crescenti. L'erosione all'interno del terreno di base si manifesta quindi in una rilevante riduzione del volume del terreno stesso e nella maturazione di considerevoli deformazioni.
- Lo stato limite di intasamento (*clogging*) si verifica quando le frazioni fini del materiale di base, trasportate dal flusso d'acqua all'interno dello strato filtrante, ne occludono progressivamente le porosità dando luogo a una graduale riduzione di permeabilità fino a comprometterne l'efficienza idraulica.

Nel caso invece di filtri in geotessile devono essere tenuti in considerazione, oltre ai precedenti, degli ulteriori stati limite legati ai fenomeni di filtrazione (Moraci e Tondello, 1996):

- Lo stato limite di accecamento (*blinding*), legato all'accumulo delle particelle fini del terreno di base all'interfaccia tra terreno e geotessile con formazione di una zona a bassa permeabilità con conseguente incremento delle pressioni neutrali.
- Lo stato limite di sollevamento, che si verifica quando tra le due facce del filtro in geotessile si ha una differenza di pressione neutrale in grado di sollevare il filtro stesso. Si tratta di una condizione che si verifica tipicamente nei rivestimenti di sponda.
- Lo stato limite di oscillazione (*flapping*), che si verifica in presenza di carichi idraulici ciclici e si manifesta come un distacco ciclico localizzato del geotessile dal terreno dovuto alle ripetute sollecitazioni nelle due direzioni. L'entità del distacco è legata alle dimensioni caratteristiche del materiale posto a contatto del geotessile ed è tanto più elevata quanto più questo è grossolano.

Capitolo 2

Compatibilità granulometrica

I fenomeni legati alla migrazione delle particelle all'interno del filtro sono determinati dal concorrere di una serie di fattori che possono essere distinti nelle seguenti categorie (Raut, 2006):

- fattori geometrici, tra cui i principali sono le curve di distribuzione granulometrica del filtro e del materiale base e la forma dei grani;
- fattori fisici, sia legati alla natura del filtro, quali la coesione, l'attrito fra le particelle e la densità, sia legati alle caratteristiche del fluido, quali temperatura e viscosità;
- fattori idraulici, tra cui il gradiente idraulico, che permettono di determinare l'entità delle forze idrodinamiche agenti all'interno del filtro;
- fattori chimici, che sono legati a processi quali flocculazione e dispersione che dipendono dalla composizione chimica del fluido, del materiale di base e di quello costituente il filtro;
- fattori biologici, legati all'azione di microrganismi all'interno del filtro che possono variarne la porosità.

I fenomeni di erosione e occlusione in un filtro dipendono quindi da un gran numero di variabili di valore spesso incerto o difficilmente quantificabile. Un'analisi che consideri l'influenza di tutti questi fattori sarebbe quindi di notevole complessità; per poter trattare tali problemi è conveniente adottare delle semplificazioni. La maggior parte dei metodi disponibili in letteratura per studiare la compatibilità granulometrica tra due materiali limita lo studio dei fenomeni di trasporto a criteri determinati da fattori di tipo geometrico, trascurando invece quelli di natura chimica, biologica, fisica e idraulica assumendo, cautelativamente, che le forze idrodinamiche siano sempre sufficienti al movimento delle particelle.

La corretta progettazione di un filtro granulare può sintetizzarsi nel soddisfacimento di due requisiti fra loro opposti: da una parte di disporre di pori sufficientemente piccoli da assicurare la trattenuta delle particelle costituenti il materiale base, dall'altra che questi siano abbastanza grandi affinché la permeabilità sia tale da consentire un agevole deflusso del fluido. Il primo requisito è denominato criterio di ritenzione, il secondo criterio di permeabilità.

2.1 Metodi empirici

Per la valutazione della compatibilità granulometrica tra materiali di caratteristiche diverse si usano spesso ancora oggi formule di natura empirica. Tali relazioni si basano generalmente sul confronto tra le dimensioni corrispondenti a certi valori del passante nelle curve di distribuzione granulometrica del materiale base e dello strato che agisce da filtro. Nel seguito si presentano i principali metodi empirici disponibili in letteratura per la valutazione della compatibilità granulometrica tra due materiali. Alcuni di questi (*Terzaghi*, *U.S.A.C.E.*) forniscono delle indicazioni per realizzare un filtro che rispetti sia il criterio di ritenzione che il criterio di permeabilità, mentre altri (*Leatherwood* e *Peterson*, *Thanikachalam* e *Sakthivadivel*) si limitano al

solo soddisfacimento del criterio di ritenzione rendendo quindi necessario lo svolgimento di ulteriori analisi per verificare che il filtro così progettato non porti alla formazione di pressioni neutrali eccessive.

2.1.1 Metodo di *Terzaghi*

Un primo, ma tuttora valido, criterio empirico per valutare la compatibilità granulometrica di un filtro granulare nei confronti di un terreno da proteggere fu proposto da *Karl Terzaghi* nel 1943. Tale metodo si articola in due disequazioni, che devono essere entrambe soddisfatte. Una prima disequazione esprime il criterio di ritenzione e si traduce secondo *Terzaghi* nell'imporre:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4 \quad (2.1)$$

dove con D_{15} e d_{85} si indicano rispettivamente la dimensione dei grani corrispondente a un passante in peso pari al 15% del materiale costituente il filtro e la dimensione dei grani corrispondente a un passante in peso pari all'85% del materiale di base.

Il criterio di permeabilità è invece soddisfatto attraverso la verifica di una seconda disequazione, che garantisce contro l'instaurarsi di pressioni interstiziali eccessive all'interfaccia tra filtro e materiale da proteggere, espressa dalla relazione:

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} > 4 \quad (2.2)$$

dove con D_{15} si indica la dimensione dei grani corrispondente a un passante pari al 15% del materiale costituente il filtro.

2.1.2 Metodo di *Leatherwood* e *Peterson*

Come già nel criterio di *Terzaghi* anche *Leatherwood* e *Peterson* (1954) legano la progettazione del filtro al rapporto tra le particelle di diametro maggiore del materiale di base e quelle di diametro minore del filtro. Mentre le

osservazioni empiriche su cui è fondato il criterio di *Terzaghi* basavano la distinzione fra filtro stabile e instabile su un'ispezione visiva, *Leatherwood* e *Peterson* utilizzarono come discriminante la misurazione della variazione della pressione idraulica. Essi notarono infatti che nel materiale di base, in prossimità dell'interfaccia, si assisteva a un incremento di velocità del fluido e conseguentemente a una riduzione della pressione idraulica man mano che le particelle più fini erano erose. Affidandosi a tali misurazioni per stabilire se un filtro era efficace o meno i due autori sono pervenuti alle due espressioni:

$$D_{15}/d_{85} < 4,1 \quad (2.3)$$

$$D_{50}/d_{50} < 5,3 \quad (2.4)$$

dove D_{15} e D_{50} sono i diametri corrispondenti rispettivamente a un passante in peso del 15% e del 50% del materiale che costituisce il filtro, mentre d_{85} e d_{50} sono i diametri associati a un passante in peso rispettivamente dell'85% e del 50% del materiale di base.

2.1.3 Metodo dello *U.S.A.C.E.*

Lo *U.S. Army Corps of Engineers* fornisce, per la progettazione di filtri granulari, dei criteri che si differenziano a seconda della classe granulometrica a cui appartiene il materiale di base.

I criteri proposti richiedono la conoscenza della curva granulometrica del materiale di base e, in modo particolare, dei passanti ai setacci ASTM 4 (4,75 mm) e ASTM 200 (0,075 mm). Qualora il materiale di base sia costituito anche da ghiaia, ossia quando il passante al setaccio ASTM 4 sia inferiore al 100%, è richiesta una correzione della curva granulometrica ottenuta moltiplicando il passante a ciascun setaccio di dimensione inferiore all'ASTM 4 per un fattore definito come il rapporto tra 100 e il passante percentuale al setaccio ASTM 4.

Sulla base della curva granulometrica, eventualmente corretta tramite il fattore appena definito, il materiale di base è classificato nelle quattro categorie della tabella 2.1.

Categoria	Passante al setaccio ASTM 200
1	$> 85\%$
2	$40\% - 85\%$
3	$15\% - 39\%$
4	$< 15\%$

Tabella 2.1: Categorie in cui è classificato il materiale di base secondo il metodo dello *U.S.A.C.E.*

Se il materiale di base rientra nella categoria 1 si richiede che il filtro soddisfi la condizione:

$$D_{15} \leq \begin{cases} 0,2 \text{ mm} & \text{se } 9 \cdot d_{85} \leq 0,2 \text{ mm} \\ 9 \cdot d_{85} & \text{se } 9 \cdot d_{85} > 0,2 \text{ mm} \end{cases} \quad (2.5)$$

dove D_{15} rappresenta il diametro corrispondente a un passante in peso del 15% del materiale che costituisce il filtro, mentre d_{85} è il diametro associato a un passante in peso dell'85% del materiale di base. Nel caso invece di materiale di base appartenente alla categoria 2 si richiede che:

$$D_{15} \leq 0,7 \text{ mm} \quad (2.6)$$

Se il materiale di base rientra nella categoria 3 invece:

$$D_{15} \leq \begin{cases} 0,7 \text{ mm} & \text{se } 4 \cdot d_{85} \leq 0,7 \text{ mm} \\ \left(\frac{40 - A}{40 - 15} \right) (4 \cdot d_{85} - 0,7 \text{ mm}) + 0,7 \text{ mm} & \text{se } 4 \cdot d_{85} > 0,7 \text{ mm} \end{cases} \quad (2.7)$$

dove A è il passante percentuale al setaccio ASTM 200. Infine, per materiale di base appartenente alla categoria 4 è fornita una relazione analoga a quella

già individuata da *Terzaghi*:

$$D_{15} \leq (4 \div 5)d_{85} \quad (2.8)$$

A prescindere dalla categoria a cui è ascritto il materiale di base si richiede poi, affinché anche il criterio di permeabilità sia soddisfatto, che:

$$D_{15} \geq (3 \div 5)d_{15} \quad (2.9)$$

dove d_{15} rappresenta il diametro corrispondente ad un passante in peso del 15% del materiale di base.

2.1.4 Metodo di *Thanikachalam* e *Sakthivadivel*

Dalla osservazione di dati sperimentali, *Thanikachalam* e *Sakthivadivel* (1974) forniscono, per la progettazione del filtro, due formule valide solo per terreni di base non coesivi:

$$d_{60}/d_{10} = 0,4(D_{10}/d_{10}) - 2 \quad (2.10)$$

$$D_{60}/D_{10} = 0,941(D_{10}/d_{10}) - 5,65 \quad (2.11)$$

dove d_{60} e d_{10} sono i diametri cui corrisponde un passante in peso pari rispettivamente al 60% e al 10% del materiale di base, mentre D_{60} e D_{10} sono le analoghe dimensioni per il materiale che costituisce lo strato filtrante.

L'intento delle formule proposte dai due autori è quello di fornire, a partire dalla curva granulometrica del materiale di base, un criterio che consenta di determinare sia la dimensione assoluta del materiale che costituisce il filtro, sia il valore del coefficiente di uniformità di tale materiale. Noti i valori d_{60}/d_{10} e d_{10} caratteristici del materiale di base, le due formule possono essere utilizzate per determinare dapprima D_{10} tramite la 2.10 e quindi, dalla 2.11, si può valutare il coefficiente di uniformità D_{60}/D_{10} del materiale che costituisce il filtro.

2.2 Metodi geometrico-probabilistici

Alcune prove in laboratorio hanno mostrato che una progettazione che si avvale dei metodi empirici presentati precedentemente può non essere sufficiente a garantire l'efficacia del filtro (Lafleur, 1984). Altri studi (Sherard, 1984) hanno al contrario mostrato come fossero efficaci filtri con un rapporto D_{15}/d_{85} sensibilmente superiore ai valori limite indicati da *Terzaghi* e dallo *U.S.A.C.E.* Parte delle teorie finora proposte non considerano la forma delle curve di distribuzione granulometriche, sia per quanto riguarda il materiale che costituisce il filtro sia per quanto riguarda il materiale di base, altre quando lo fanno si limitano a esprimere un coefficiente di uniformità.

Uno studio più approfondito richiede la creazione di modelli matematici che implementino le curve granulometriche del materiale di base e del materiale che costituisce il filtro e che, attraverso considerazioni di tipo probabilistico, siano in grado di fornire informazioni sullo spessore che è necessario assegnare al filtro analizzando le dinamiche che si verificano al suo interno.

2.2.1 Metodo di *Musso* e *Federico*

Il metodo presentato in questo paragrafo è stato sviluppato da *Musso* e *Federico* nel 1983, basandosi sugli studi compiuti da *Silveira* nel 1965. Negli anni successivi numerosi autori hanno portato dei contributi a tale teoria che saranno di seguito discussi.

Il metodo si propone di studiare il trasporto di una particella appartenente al materiale base all'interno della matrice porosa costituita dallo strato filtrante, fornendo informazioni sulla lunghezza del percorso che questa copre prima di arrestarsi. L'ipotesi fondamentale su cui si sorregge tale metodo è quella di particelle di forma sferica. Si ipotizza inoltre di trascurare il fenomeno di progressiva contaminazione del filtro per opera delle particelle di materiale di base che sono trasportate e si arrestano al suo interno. Infine

si suppone che il percorso coperto da una particella nello strato filtrante sia quello a cui compete la minima lunghezza.

Il filtro è costituito da uno scheletro solido e da una matrice porosa formata dai vuoti fra le particelle. Una particella del terreno da proteggere potrà spostarsi all'interno della matrice porosa fintanto che le dimensioni dei vuoti che incontra sono sufficientemente grandi da non trattenerla. Un filtro che soddisfi il criterio di ritenzione deve avere uno spessore superiore al percorso che le particelle di materiale base coprono al suo interno prima di essere arrestate.

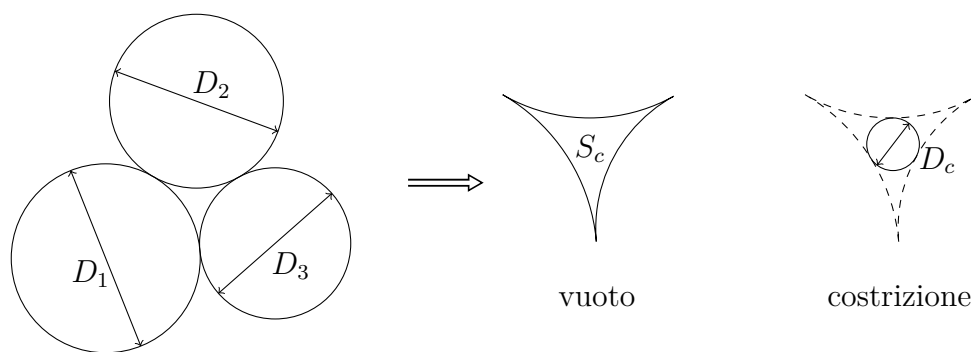


Figura 2.1: Definizione di costrizione.

Il criterio per stabilire se le dimensioni di un vuoto sono sufficienti a consentire il passaggio di una particella fa riferimento al diametro della costrizione corrispondente. Con il termine costrizione (*constriction* nella letteratura anglosassone) si indica la dimensione della sfera di massimo diametro che può essere inscritta nel vuoto che si forma tra tre o quattro particelle (figura 2.1). Indicato con d il diametro della particella trasportata all'interno del filtro e con D_c il diametro della costrizione, l'arresto della particella si verificherà quando $d > D_c$.

Distribuzione delle costrizioni

La determinazione della distribuzione probabilistica delle costrizioni presenti nello strato filtrante può essere fatta schematizzando come prima cosa la curva di distribuzione granulometrica con una spezzata costituita da una serie di N segmenti verticali a cui vanno attribuite altrettante coppie di valori $(D_i, \Delta p_{m,i})$ che rappresentano il diametro e la percentuale in peso ad essi associata.

La distribuzione delle costrizioni è differente a seconda della densità relativa¹ a cui si trova il materiale che costituisce lo strato filtrante.

Nel caso in cui il filtro si trovi nella configurazione di massima densità le particelle che lo costituiscono sono disposte secondo il reticolo tetraedrico (figura 2.2) e la formazione di una costrizione è quindi frutto dell'incontro di tre particelle prese casualmente. Il numero totale delle possibili terne (D_1, D_2, D_3) è dato dal numero delle combinazioni con ripetizione degli N diametri in classe tre, che è calcolabile con la relazione:

$$C_{N,3}^r = \binom{N+3-1}{3} = \frac{(N+3-1)!}{3!(N-1)!} = \frac{N(N+1)(N+2)}{6} \quad (2.12)$$

Il diametro della costrizione che si realizza tra tre particelle sferiche di diametro D_1 , D_2 e D_3 può essere calcolato con la relazione:

$$\left(\frac{2}{D_1}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_2}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_3}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_{cD}}\right)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{D_1} + \frac{2}{D_2} + \frac{2}{D_3} + \frac{2}{D_{cD}}\right)^2 \quad (2.13)$$

¹La densità relativa è un parametro utile a descrivere lo stato di addensamento di un terreno. Essa è definita dalla relazione:

$$\frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}}$$

dove e_0 è l'indice dei vuoti del materiale allo stato attuale mentre e_{max} e e_{min} sono gli indici dei vuoti che corrispondono rispettivamente al massimo e al minimo stato di addensamento del materiale preso in considerazione. La densità relativa varia dallo 0% al 100%, dove il valore più basso sta ad indicare un materiale molto sciolto e il valore più alto un materiale molto denso.

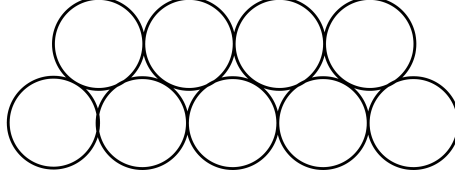


Figura 2.2: Disposizione delle particelle secondo il reticolo tetraedrico

La probabilità Δp_c con cui una costrizione si realizza all'interno del filtro è funzione delle probabilità Δp_1 , Δp_2 e Δp_3 associate rispettivamente ai diametri D_1 , D_2 e D_3 . Per esprimere tale probabilità *Silveira* ha individuato la seguente formula:

$$\Delta p_c(D_{cD}) = \frac{3!}{r_1!r_2!r_3!} \Delta p_1 \Delta p_2 \Delta p_3 \quad (2.14)$$

dove r_1 , r_2 , r_3 rappresentano il numero di volte in cui la particella rispettivamente di diametro D_1 , D_2 , D_3 , compare nella formazione della terna.

Quando si consideri il caso in cui il filtro si trovi nella configurazione di minima densità le particelle sono posizionate secondo il reticolo cubico (figura 2.3) e le costrizioni nascono dall'incontro di quattro particelle. Secondo *Silveira et al.* (1975), con riferimento alla figura 2.4, la dimensione del vuoto che si crea in tale caso è data da:

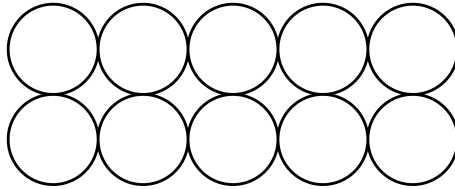


Figura 2.3: Disposizione delle particelle secondo il reticolo cubico

$$S_c = \frac{1}{8} \left((D_1 + D_2)(D_1 + D_4) \sin \alpha + (D_2 + D_3)(D_2 + D_4) \sin \gamma - (\alpha D_1^2 + \beta D_2^2 + \gamma D_3^2 + \delta D_4^2) \right) \quad (2.15)$$

dove gli angoli β , γ , δ , possono essere facilmente espressi in funzione dell'angolo α utilizzando le relazioni della geometria piana e in particolare i teoremi del seno e del coseno. L'angolo α può variare tra un valore minimo α_{min} quando le particelle D_2 e D_4 sono in contatto tra loro e un valore massimo α_{max} quando invece si toccano le particelle D_1 e D_3 . La configurazione di minima densità si ottiene per quel valore di α compreso tra i due estremi per il quale la dimensione del vuoto raggiunge il valore massimo $S_{c,max}$. La dimensione D_{cL} della costrizione può essere approssimata al diametro cui corrisponde una superficie circolare di area pari a quella del vuoto $S_{c,max}$, ossia:

$$D_{cL} = \sqrt{\frac{4S_{c,max}}{\pi}} \quad (2.16)$$

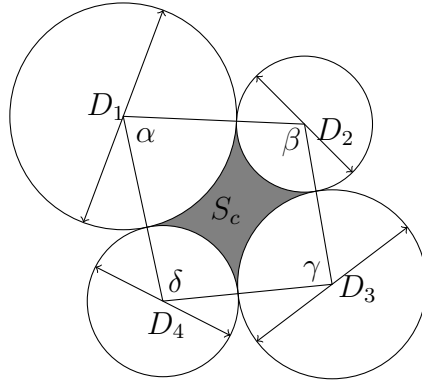


Figura 2.4: Il vuoto che si genera dall'incontro di quattro particelle.

Secondo alcuni autori la dimensione così valutata per la costrizione è eccessiva poiché non tiene conto che, diversamente dal caso di configurazione a massima densità, le quattro particelle non si trovano qui necessariamente nello stesso piano. Per far fronte a ciò *Schuster* (1996) propone di utilizzare un coefficiente correttivo pari a 0,82 sul diametro D_{cL} . Nelle analisi effettuate nei successivi capitoli tale coefficiente è stato tuttavia cautelativamente tralasciato.

Il numero delle possibili quaterne (D_1, D_2, D_3, D_4) che formano una co-

strizione è dato dal numero di combinazioni con ripetizione degli N elementi in classe 4:

$$C_{N,4} = \binom{N+4-1}{4} = \frac{(N+4-1)!}{4!(N-1)!} = \frac{N(N+1)(N+2)(N+3)}{24} \quad (2.17)$$

La probabilità di occorrenza di una costrizione di un certo diametro è anche in questo caso legata alle frequenze Δp_1 , Δp_2 , Δp_3 e Δp_4 delle singole particelle che la generano. Tale probabilità è valutabile con la relazione:

$$\Delta p_c(D_{cL}) = \frac{4!}{r_1!r_2!r_3!r_4!} \Delta p_1 \Delta p_2 \Delta p_3 \Delta p_4 \quad (2.18)$$

dove r_1 , r_2 , r_3 e r_4 indicano il numero di volte che le particelle di diametro D_1 , D_2 , D_3 e D_4 compaiono nella formazione della quaterna che genera la costrizione.

Le relazioni viste permettono di determinare le curve di distribuzione probabilistica delle costrizioni nelle due configurazioni a massima densità e a minima densità una volta che siano note le probabilità di occorrenza dei diametri in cui è stata discretizzata la granulometria del filtro.

Nell'approccio proposto originariamente da *Silveira* tali probabilità sono ottenute dalla distribuzione percentuale in peso della composizione granulometrica del filtro. In questo modo però le particelle più grossolane, che hanno una massa elevata, ma sono presenti in un numero contenuto, assumono un'importanza eccessiva nel modello (Raut, 2006). L'incontro di più particelle di diametro elevato, e quindi la formazione di una costrizione di grosse dimensioni, nella realtà ha infatti una scarsa probabilità di accadimento essendo tali particelle presenti in numero contenuto. L'adozione della distribuzione percentuale in peso tende quindi a sovrarappresentare le costrizioni formate dalle particelle appartenenti alla frazione granulometrica più grossa del filtro.

Musso e *Federico* suggeriscono allora di passare dalla distribuzione in percentuale del peso alla composizione in percentuale del numero di particelle

utilizzando la relazione:

$$\Delta p_{n,i} = \frac{\frac{\Delta p_{m,i}}{D_i^3}}{\sum_{i=1}^N \frac{\Delta p_{m,i}}{D_i^3}} \quad (2.19)$$

nella quale $\Delta p_{n,i}$ e $\Delta p_{m,i}$ rappresentano rispettivamente la percentuale numerica e quella in peso della frazione di diametro D_i . Anche l'adozione della distribuzione numerica tuttavia è poco opportuna poiché sovrarappresenta le costrizioni generate dalle frazioni fini (Raut, 2006). Una particella di diametro elevato ha infatti una superficie esterna considerevolmente maggiore rispetto a una particella fine, pertanto entra in contatto con un numero di particelle superiore e quindi contribuisce alla formazione di un numero di costrizioni maggiore rispetto a una particella fine.

Un approccio più vicino alla realtà, che sarà utilizzato nei prossimi capitoli, è quello proposto da *Humes* (1996) in cui si considera la distribuzione in percentuale della superficie esterna delle particelle che costituiscono il filtro. Per giungere a tale distribuzione può essere utilizzata la relazione:

$$\Delta p_{SA,i} = \frac{\frac{\Delta p_{m,i}}{D_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{\Delta p_{m,i}}{D_i}} \quad (2.20)$$

dove $\Delta p_{SA,i}$ indica la percentuale in superficie esterna della frazione di diametro D_i .

La possibilità di determinare la curva di distribuzione delle costrizioni in situazioni intermedie rispetto a quelle di configurazione a minima e massima densità è stata indagata da *Locke et al.* (2001) che, in funzione della densità relativa R_d con cui è realizzato il filtro, hanno individuato la relazione:

$$D_c = D_{cD} + p_c(1 - R_d)(D_{cL} - D_{cD}) \quad (2.21)$$

dove D_c indica la dimensione della costrizione, nella configurazione con den-

sità relativa R_d , per la quale la frazione p_c delle costrizioni ha dimensioni inferiori, mentre D_{cD} e D_{cL} sono le corrispondenti dimensioni delle costrizioni nelle configurazioni rispettivamente di massima e minima densità. Facendo quindi variare p_c da 0 a 1 si determina la curva di distribuzione delle costrizioni per un filtro in condizioni di addensamento intermedio.

Analisi del processo di trasporto

Lo studio del trasporto delle particelle di materiale di base all'interno dello strato filtrante consiste nel confrontare la curva di distribuzione granulometrica del materiale di base con la curva di distribuzione delle costrizioni del filtro.

Indicando con $D_{c,min}$ e $D_{c,max}$ il minimo e il massimo diametro delle costrizioni che si formano nello strato filtrante, può affermarsi che tutte le particelle del materiale base con diametro $d < D_{c,min}$ che entrano nello strato filtrante possono attraversarlo senza incontrare costrizioni sufficientemente minute da arrestarle. Analogamente tutte le particelle di materiale base con diametro $d > D_{c,max}$ non possono penetrare nel filtro poiché non vi sono costrizioni sufficientemente grandi da permetterne il passaggio.

Per esaminare il comportamento delle particelle del materiale base con diametro compreso tra $D_{c,min}$ e $D_{c,max}$ è necessario sviluppare un modello probabilistico che sia in grado di individuare quale è la probabilità che dopo m confronti una particella di un certo diametro venga arrestata all'interno del filtro.

Nell'ipotesi che i singoli confronti fra costrizione e particella siano tra loro indipendenti la probabilità che una particella di diametro d non incontri dopo m confronti una costrizione in grado di arrestarla è data da:

$$\lambda = (1 - p_c)^m \quad (2.22)$$

dove p_c è la probabilità cumulata, desunta dalla curva di distribuzione delle

costrizioni, che si verifichi una costrizione di diametro pari a d .

La probabilità che la particella di diametro d sia arrestata dopo m confronti è allora:

$$\mu = 1 - \lambda = 1 - (1 - p_c)^m \quad (2.23)$$

assumendo quindi un livello di confidenza p'_0 può scriversi:

$$1 - (1 - p_c)^m = p'_0 \quad (2.24)$$

da cui si ottiene con semplici passaggi il numero di confronti necessari ad arrestare la particella con un livello di confidenza p'_0 :

$$m = \frac{\ln(1 - p'_0)}{\ln(1 - p_c)} \quad (2.25)$$

Dal numero di confronti tra particella e costrizioni m si può stimare la lunghezza del percorso compiuto dalla particella di materiale base all'interno del filtro. Si tratta quindi di determinare la lunghezza caratteristica che rappresenti il percorso unitario mediamente compiuto da una particella ad ogni confronto. Moltiplicando poi tale lunghezza per il numero di confronti si perviene a una stima del percorso totale che può fare una particella con un certo livello di confidenza.

Il percorso unitario s è valutato a partire dalla curva di distribuzione granulometrica del filtro. Una prima espressione per valutare tale lunghezza è stata proposta da *Silveira* considerando questa come *la media geometrica della N-upla di valori dei diametri che discretizzano la curva granulometrica del filtro in percentuale del peso* (Musso e Federico, 1984):

$$s = \prod_{i=1}^N D_i^{\frac{1}{N}} \quad (2.26)$$

Il metodo proposto da *Silveira* non tiene però conto delle percentuali corrispondenti ai diametri D_i , così che è possibile pervenire all'assurdo che

curve di distribuzione granulometrica differenti possono generare il medesimo valore del percorso unitario s .

Il metodo proposto da *Musso* e *Federico* considera invece più correttamente il valore medio dei diametri ponderati sulle percentuali numeriche:

$$s = \sum_{i=1}^N D_i \cdot \Delta p_{n,i} \quad (2.27)$$

Sarà proprio tale espressione quella che sarà utilizzata nelle applicazioni trattate nei successivi capitoli per valutare lo spessore che è necessario attribuire al filtro affinché possa esercitare una funzione di ritenzione nei confronti delle particelle appartenenti al materiale da proteggere.

Capitolo 3

Stabilità interna

Il rispetto dei criteri di compatibilità granulometrica tra strati di materiale adiacenti può non essere sufficiente a realizzare un filtro efficace. All'interno di un singolo strato può infatti avvenire, per effetto di sollecitazioni esterne quali vibrazioni o moti di filtrazione, un fenomeno di migrazione della frazione fine all'interno dei vuoti che si formano tra le particelle più grossolane (Chapuis, 1992). Tale tipo di fenomeno è spesso indicato in letteratura con i termini *instabilità interna* o *soffusione*, mentre un materiale che sia verificato contro il manifestarsi di tale tipo di problematica si definisce *internamente stabile* o *autoprotetto*. Un filtro internamente instabile è soggetto alla depauperazione delle frazioni fini e, di conseguenza, alla trasformazione della curva di distribuzione granulometrica che lo rappresenta. Ciò può determinare il venir meno della compatibilità granulometrica fra filtro e strato sovrastante, e quindi la perdita di efficacia del filtro.

I materiali internamente stabili sono generalmente caratterizzati da una curva granulometrica molto estesa e con concavità rivolta verso l'alto oppure che presenti forti irregolarità o discontinuità (Wan e Fell, 2008). Si è tuttavia dimostrato che anche materiali che presentano una curva di distribuzione granulometrica regolare possono essere soggetti a soffusione.

Per valutare l'incidenza dei fenomeni di instabilità interna possono essere

eseguite delle prove mediante permeametro, sottoponendo un campione del materiale da analizzare a vibrazioni e a moti di filtrazione per indurre la migrazione delle particelle che lo costituiscono. Tali sollecitazioni sono applicate fintanto che non si esaurisce il trasporto solido nel flusso d'acqua in uscita dal campione e fintanto che la portata idraulica in uscita e le pressioni misurate a varie profondità non raggiungono valori costanti (Wan e Fell, 2008). La suscettibilità a fenomeni di soffusione può quindi essere valutata determinando la variazione nella composizione granulometria del campione a diverse profondità.

3.1 Metodi empirici

Nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi criteri empirici che permettono di stimare la suscettibilità di un materiale a fenomeni di instabilità interna basandosi sulla geometria della curva di distribuzione granulometrica del materiale. Fra tali criteri quelli che trovano più largo impiego nella pratica ingegneristica (Li, 2008) e che saranno di seguito presentati sono quelli di *Kezdi*, di *Kenney* e *Lau* e di *Burenkova*.

Recentemente *Moraci et al.* (2012a) hanno sviluppato un modello che impiega simulazioni di Monte Carlo per valutare se un materiale è soggetto a soffusione. Le analisi per la verifica di tale modello attraverso il confronto con dati sperimentali sono però ancora limitate e non sufficienti a garantirne la validità.

3.1.1 Metodo di *Kezdi*

Il metodo sviluppato da *Kezdi* (1969) per valutare se un terreno è internamente stabile o meno consiste nel determinare per prima cosa le curve di distribuzione granulometrica del passante e del trattenuto per ciascun diametro \bar{d} delle particelle che lo costituiscono e quindi applicare il criterio di *Terzaghi* alle coppie di curve granulometriche così individuate, utilizzando la

frazione grossolana come filtro e la frazione fine come materiale di base. Si deve dunque verificare che:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4 \quad (3.1)$$

dove D_{15} e d_{85} rappresentano le dimensioni dei grani in corrispondenza del 15% e dell'85%, rispettivamente, del trattenuto e del passante a un setaccio con aperture delle maglie pari a \bar{d} .

Un metodo molto simile a quello di *Kezdi*, proposto da *Sherard* (1979), si avvale, dopo aver suddiviso la granulometria in una frazione fine e una grossolana, di un indice di instabilità I_r , definito come:

$$I_r = \frac{D_{15}}{d_{85}} \quad (3.2)$$

dove i termini D_{15} e d_{85} assumono i medesimi significati che hanno nel metodo di *Kezdi*. Tale indice di instabilità I_r deve risultare, affinché la verifica contro fenomeni di instabilità interna sia soddisfatta, inferiore a 5 per qualsiasi diametro \bar{d} utilizzato per la suddivisione della curva granulometrica.

Li e *Fannin* (2008) hanno notato, dal confronto con osservazioni sulla stabilità interna di una serie di campioni condotte in precedenza da numerosi autori, che il criterio proposto da *Kezdi* è discretamente valido per terreni caratterizzati da curve granulometriche che presentino discontinuità, mentre si rileva spesso troppo conservativo per quanto riguarda terreni che presentino curve granulometriche estese.

3.1.2 Metodo di *Kenney* e *Lau*

Kenney e *Lau* (1985) hanno osservato come all'interno dei materiali granulari si realizzi una struttura primaria a cui compete il trasferimento delle tensioni e una struttura secondaria costituita dalle particelle più fini che si dispongono all'interno dei vuoti che si formano tra le particelle appartenenti alla struttura primaria. A differenza delle particelle appartenenti alla struttura

primaria, che possono considerarsi in una posizione fissa, le particelle della struttura secondaria si muovono all'interno dei vuoti e fra un vuoto e quello adiacente sotto l'effetto di sollecitazioni esterne causate per esempio da moti di filtrazione o vibrazioni. La potenziale instabilità interna di un materiale è da attribuirsi a queste particelle mobili. La struttura primaria può essere trattata come un filtro, mentre le particelle della struttura secondaria possono essere considerate come il materiale di base da proteggere. Quando una particella mobile nel suo moto di migrazione incontra una costrizione sufficientemente minuta da arrestarla, diventa anche essa parte del filtro. Questo è dunque costituito dalla struttura primaria, a cui si aggiungono le particelle appartenenti alla struttura secondaria bloccate dalle costrizioni in grado di arrestarle. Un materiale internamente instabile è caratterizzato da un numero di particelle di una certa dimensione insufficiente a chiudere le costrizioni di dimensioni comparabili, così che le particelle di dimensioni minori, per cui tali costrizioni rimaste aperte sono eccessivamente ampie, sono soggette a erosione essendo libere di essere trasportate all'interno del materiale granulare.

Dall'osservazione di un gran numero di prove sperimentali i due autori hanno notato come generalmente la dimensione assoluta delle particelle che costituiscono il terreno ha un'influenza trascurabile sulla suscettibilità a problemi di instabilità interna rispetto alla forma della curva di distribuzione granulometrica.

Il criterio proposto da *Kenney* e *Lau* per stabilire se un materiale è internamente stabile ricorre a una descrizione della forma della curva di distribuzione granulometrica che consiste, con riferimento alla figura 3.1, nel determinare, per ogni valore del passante in peso F cui è associato il diametro D , la percentuale in peso H compresa tra i diametri D e $4D$. Tracciando in un grafico la curva $H - F$ è possibile confrontare come questa si pone nei confronti della curva limite che indica il minimo valore di H richiesto affinché il materiale sia internamente stabile. Per descrivere tale curva limite

Kenney e *Lau*, basandosi sugli studi compiuti nel 1969 da *Loebotsjkov*, hanno inizialmente suggerito l'equazione:

$$H = 1,3F \quad (3.3)$$

successivamente, a seguito delle osservazioni fatte da *Milligan* (1986), che riteneva tale curva limite eccessivamente cautelativa, i due autori rivederono tale equazione nella seguente (*Kenney* e *Lau*, 1986):

$$H = F \quad (3.4)$$

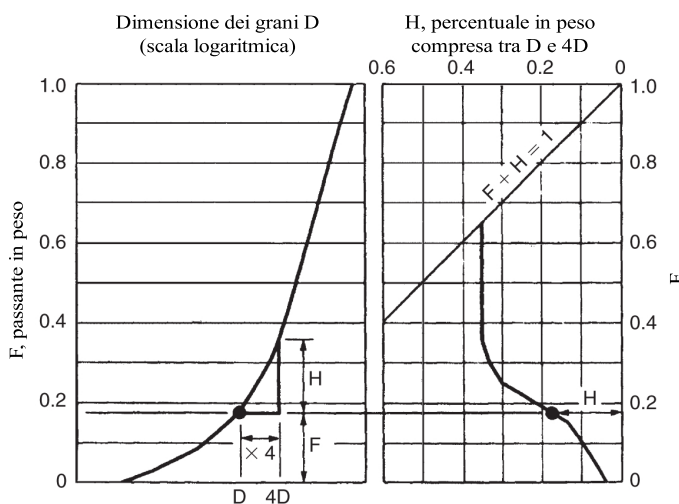


Figura 3.1: Metodo utilizzato per descrivere la forma di una curva di distribuzione granulometrica (*Kenney* e *Lau*, 1985)

Non è necessario che l'intera curva che descrive la forma della curva granulometrica sia collocata al di sopra della curva limite $H = F$ affinché il materiale sia internamente stabile, è infatti sufficiente che tale criterio sia rispettato per la sola frazione che rappresenta le particelle mobili (*Kenney* e *Lau*, 1985). Una stima del massimo contenuto di tali particelle all'interno di un materiale può essere fatta considerando la configurazione in cui i pori della struttura primaria siano riempiti da particelle fini poste nella configu-

razione di minima densità. Indicando con f_p la frazione in peso che forma la struttura primaria e con f_1 le particelle mobili, si può scrivere:

$$f_p + f_1 = 1 \quad (3.5)$$

il termine f_p può quindi essere scritto in funzione dell'indice dei vuoti della struttura primaria e_p e della porosità media n_1 delle particelle mobili all'interno dei vuoti della struttura primaria:

$$f_p \geq \frac{1}{1 + e_p(1 - n_1)} \quad (3.6)$$

Per terreni abbastanza uniformi, considerando $e_p = 0,7$ e $n_1 = 0,4$, si hanno valori di $f_p \geq 0,7$, le particelle mobili rappresentano quindi una percentuale non superiore al 30% in peso. Per terreni molto variegati, adottando $e_p = 0,4$ e $n_1 = 0,4$, si trovano valori di $f_p \geq 0,8$, le particelle mobili non eccedono di conseguenza il 20% in peso. Ne consegue quindi che in materiali che presentino una curva granulometrica poco ampia il criterio di *Kenney* e *Lau* deve essere verificato per $0 \leq F \leq 0,3$, mentre per curve granulometriche molto variegata tale intervallo si riduce a $0 \leq F \leq 0,2$.

Analisi svolte da *Li* e *Fannin* (2008) hanno evidenziato come il metodo di *Kenney* e *Lau* si riveli abbastanza preciso se applicato a terreni che presentino curve di distribuzione granulometrica estesa, mentre è spesso troppo cautelativo per terreni caratterizzati da curve di distribuzione granulometriche discontinue.

3.1.3 Metodo di *Burenkova*

Il metodo proposto da *Burenkova* (1993) per valutare se un materiale è garantito contro fenomeni di instabilità interna è applicabile a materiali con coefficiente di uniformità C_u inferiori a 200 e dimensione massima dei grani fino a 100 mm. Il metodo si basa sui parametri desumibili dalla curva

granulometrica del materiale:

$$h' = d_{90}/d_{60} \quad (3.7)$$

$$h'' = d_{90}/d_{15} \quad (3.8)$$

dove d_{90} , d_{60} e d_{15} sono rispettivamente le dimensioni corrispondenti ai passanti in peso del 90%, del 60% e del 15%. Il criterio proposto dall'autore individua come internamente stabili i materiali che ricadono all'interno del dominio:

$$0,76 \log(h'') + 1 < h' < 1,86 \log(h'') + 1 \quad (3.9)$$

I giudizi sulla validità del metodo reperibili in letteratura appaiono discordanti, mentre infatti alcuni autori (Li, 2008) lo giudicano eccessivamente conservativo, altri (Wan e Fell, 2004) hanno osservato una buona rispondenza con i risultati sperimentali, altri ancora (Rönnqvist, 2010) lo ritengono non idoneo a distinguere fra materiali internamente stabili e non.

Capitolo 4

Moti di filtrazione nelle discariche

4.1 Tipologie di discarica

Il Decreto Legislativo 36 del 2003, recependo la normativa della Comunità Europea 1999/31/CE, disciplina la progettazione e la costruzione delle discariche per rifiuti, che sono classificate nelle tre categorie:

- Discarica per rifiuti inerti;
- Discarica per rifiuti non pericolosi;
- Discarica per rifiuti pericolosi.

Tali categorie si differenziano per il tipo di rifiuto che è possibile conferirvi e per i requisiti imposti dalla normativa per garantire la protezione dei terreni e delle acque.

In Italia i criteri di ammissibilità dei rifiuti per le tre categorie di discarica sono stabiliti nel Decreto Ministeriale 27 settembre 2010. I prodotti che possono essere ammessi in una discarica per rifiuti inerti possono essere conferiti anche in discariche per rifiuti non pericolosi e per rifiuti pericolosi,

così come quelli che possono essere conferiti nelle discariche per rifiuti non pericolosi possono essere accettati anche nelle discariche per rifiuti pericolosi. Per ciascuna categoria di discarica il Decreto Ministeriale indica dei valori limite massimi per una serie di composti chimici che devono essere rispettati nell'eluato ottenuto dall'esecuzione di test di cessione.

La protezione dei terreni, delle acque e più in generale dell'ambiente esterno dalla contaminazione con i rifiuti si ottiene predisponendo una barriera di confinamento alla base e ai fianchi della discarica e una copertura in sommità. Tali elementi devono inoltre provvedere a una serie di funzioni complementari quali fornire un supporto meccanico al cumulo di rifiuti e limitare l'infiltrazione di acqua meteorica all'interno della discarica. Quando necessario vanno inoltre affiancati a questi degli strati di materiale drenante destinati all'indirizzamento dei flussi di biogas e di percolato.

I differenti livelli di rischio ambientale sottesi alle prescrizioni sul rifiuto ammissibile nelle tre categorie di discarica, fanno sì che anche le misure di tutela ambientale richieste siano diverse.

Nelle discariche per rifiuti inerti la normativa richiede che sia presente una barriera geologica di fondo costituita da uno strato di materiale con permeabilità $k \leq 10^{-7}$ m/s e spessore almeno pari a 1 metro, qualora questa non soddisfi naturalmente le caratteristiche richieste può essere integrata artificialmente attraverso un sistema barriera di confinamento opportunamente realizzato. Al di sopra della barriera geologica di fondo (ma non necessariamente a contatto con essa) va realizzata una barriera di confinamento artificiale realizzata accoppiando una geomembrana a uno strato di materiale granulare di spessore pari ad almeno 1 metro e conducibilità idraulica inferiore a $k \leq 10^{-7}$ m/s. Non sono invece fornite prescrizioni per quanto riguarda gli strati per il drenaggio e la raccolta del percolato. Per quanto riguarda la copertura, procedendo dall'alto verso il basso, sono richiesti: uno strato di terreno vegetale di spessore almeno pari a 1 metro che protegga dall'erosione e dalle escursioni termiche e permetta il ripristino ambientale

del sito; uno strato drenante con spessore di almeno 0,5 metri che allontani il flusso d'acqua dovuto alle precipitazioni meteoriche impedendo la formazione di un battente idraulico; uno strato di barriera minerale a bassa permeabilità con spessore pari ad almeno 0,5 metri, ma per il quale la normativa non fornisce un valore limite di conducibilità idraulica; uno strato di regolarizzazione, costituito da materiale drenante che favorisca la posa in opera degli strati superiori.

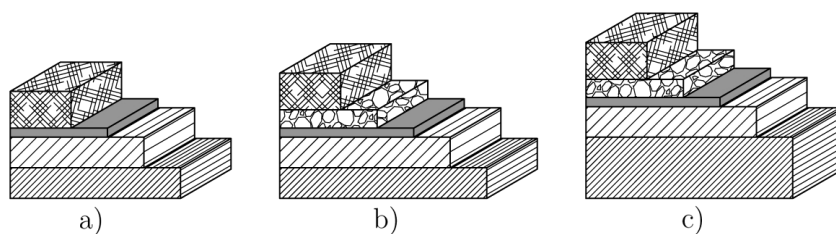


Figura 4.1: Schema del pacchetto di fondo per le diverse categorie di discarica. a) Discarica per rifiuti inerti, dal basso verso l'alto: barriera geologica, barriera di confinamento, geomembrana, rifiuto; b) Discarica per rifiuti non pericolosi, dal basso verso l'alto: barriera geologica, barriera di confinamento, geomembrana, strato di drenaggio del percolato, rifiuto; c) Discarica per rifiuti pericolosi, dal basso verso l'alto: barriera geologica, barriera di confinamento con geomembrana, strato di drenaggio del percolato, rifiuto.

Nelle discariche per rifiuti solidi urbani non pericolosi la progettazione degli strati che costituiscono il pacchetto di fondo e il pacchetto di copertura risulta essere più articolata per far fronte ai problemi supplementari legati alla rilevante produzione di percolato e biogas connessa alla presenza, all'interno del cumulo di rifiuti, di una quantità non trascurabile di materiale soggetto a decomposizione organica. Per quanto riguarda lo strato di fondo si richiede che la barriera geologica, eventualmente integrata, garantisca una permeabilità equivalente a quella di uno strato di spessore pari ad almeno 1 metro e conducibilità idraulica $k \leq 10^{-9}$ m/s. Al di sopra della barriera geologica di fondo va realizzata una barriera di confinamento artificiale di spessore pari ad almeno 1 metro e conducibilità idraulica inferiore a $k \leq 10^{-7}$ m/s affiancata da una geomembrana. Al di sopra di questa va disposto uno strato di materiale drenante, generalmente realizzato in terreno granulare,

con spessore pari ad almeno 0,5 metri, che ha il compito di raccogliere e convogliare il percolato al sistema di raccolta. Per quanto concerne il pacchetto di copertura la normativa prevede, dall'alto verso il basso: uno strato di terreno vegetale di spessore pari ad almeno 1 metro; uno strato drenante di spessore maggiore o uguale a 0,5 metri; uno strato di barriera minerale, con il compito di minimizzare le infiltrazioni d'acqua dall'esterno, per il quale è prescritto uno spessore pari ad almeno 0,5 metri e una permeabilità $k \leq 10^{-8}$ m/s; uno strato di materiale drenante dello spessore di almeno 0,5 metri con finalità di rottura capillare e soprattutto di drenaggio e convogliamento del biogas prodotto all'interno della discarica; uno strato di regolarizzazione che permetta la regolare messa in opera degli strati sovrastanti.

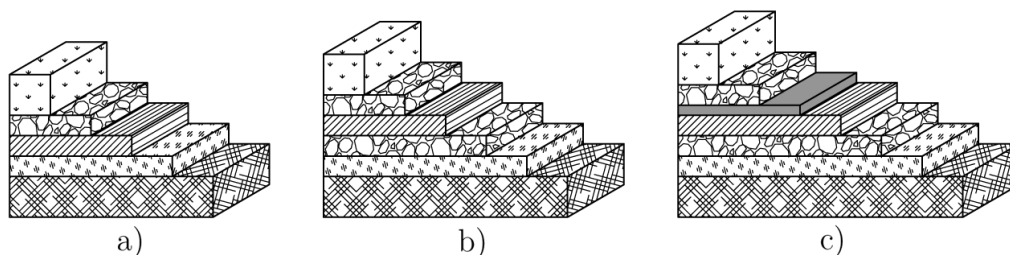


Figura 4.2: Schema del pacchetto di copertura per le diverse categorie di discarica. a) Discarica per rifiuti inerti, dall'alto verso il basso: terreno vegetale, strato di drenaggio delle acque meteoriche, barriera minerale, strato di regolarizzazione, rifiuto; b) Discarica per rifiuti non pericolosi, dall'alto verso il basso: terreno vegetale, strato di drenaggio delle acque meteoriche, barriera minerale, strato di drenaggio del biogas, strato di regolarizzazione, rifiuto; c) Discarica per rifiuti pericolosi, dall'alto verso il basso: terreno vegetale, strato di drenaggio delle acque meteoriche, geomembrana impermeabile, barriera minerale, strato di drenaggio del biogas, strato di regolarizzazione, rifiuto.

Infine, nelle discariche per rifiuti solidi urbani pericolosi, i requisiti già visti nelle discariche per rifiuti non pericolosi sono ulteriormente rafforzati, imponendo, per il pacchetto di fondo, che lo strato di barriera geologica, eventualmente integrato, garantisca una permeabilità equivalente a quella ottenuta da uno spessore maggiore o uguale a 5 metri con conducibilità idraulica $k \leq 10^{-9}$ m/s. Al di sopra della barriera geologica di fondo deve essere realizzata una barriera di confinamento con le medesime caratteristiche di

quella per discariche per rifiuti non pericolosi e a cui è sovrapposto uno strato drenante di spessore pari ad almeno 0,5 metri per consentire il drenaggio del percolato. Per il pacchetto di copertura la normativa prescrive, dall'alto verso il basso: uno strato di terreno vegetale con spessore pari ad almeno 1 metro; uno strato drenante di spessore maggiore o uguale a 0,5 metri; un rivestimento impermeabile artificiale, generalmente realizzato mediante l'impiego di una geomembrana; una barriera minerale di permeabilità $k \leq 10^{-8}$ m/s e spessore di almeno 0,5 metri; uno strato per il drenaggio del biogas di spessore maggiore o uguale a 0,5 metri; uno strato di regolarizzazione.

4.2 Problemi connessi alla filtrazione

Le problematiche conseguenti all'alterazione delle proprietà granulometriche degli strati costituenti il pacchetto di fondo e il pacchetto di copertura possono essere particolarmente gravi. Dal punto di vista ambientale le conseguenze di una progettazione poco accurata possono portare alla contaminazione dei terreni circostanti e delle falde acquifere da parte degli inquinanti organici e inorganici contenuti nei reflui prodotti dalla discarica. L'uso da parte dell'uomo delle acque contaminate risulta di conseguenza pregiudicato non solo per fini domestici, ma anche per fini agricoli e con ripercussioni spesso drammatiche sull'ambiente naturale. Gravi danni possono inoltre verificarsi anche qualora sia compromesso il corretto funzionamento dello strato destinato al drenaggio del biogas. L'eventuale dispersione del biogas nell'ambiente può contribuire infatti in maniera rilevante allo sviluppo dell'effetto serra. Il biogas è inoltre costituito in larga misura da gas potenzialmente esplosivi, principalmente metano (45%-65%) e in misura minore idrogeno, l'accumulo di tali gas al di sotto dello strato di copertura della discarica può quindi creare pericoli di esplosione, sia nel sito della discarica, sia in edifici posti a una certa distanza da essa qualora i gas trovino una via di fuga nel corpo della discarica e viaggino attraverso terreni permeabili.

Oltre alle problematiche per la salute pubblica di cui si è accennato ve ne sono poi altre di carattere economico, tra le quali i costi di bonifica in caso di contaminazioni dei terreni o delle falde, ma anche più semplicemente l'aggravio dei costi di gestione. Il depauperamento della frazione fine dello strato che costituisce la barriera minerale nel pacchetto di copertura può per esempio dar luogo a un marcato aumento della quantità di acqua che si infiltra nel cumulo di rifiuti a seguito delle precipitazioni meteoriche. Questo determina un aumento di produzione di percolato e quindi un considerevole incremento dei costi legati al suo smaltimento.

Alla luce di queste considerazioni l'applicazione delle teorie presentate nei precedenti capitoli appare utile per giungere a una progettazione della discarica che, fondandosi sulla conoscenza delle caratteristiche granulometriche dei diversi strati che costituiscono il fondo e la copertura, valuti se è necessaria l'interposizione di strati filtranti e, nel caso, ne determini la composizione e lo spessore. Una progettazione che tenga conto delle problematiche connesse ai moti di filtrazioni si deve rivolgere principalmente alla tutela della barriera minerale nello strato di copertura e, alla base della discarica, alla protezione da fenomeni di intasamento dello strato di drenaggio per lo smaltimento del percolato. Nei successivi capitoli si affronteranno tali questioni in dettaglio nel tentativo di giungere alla definizione di alcune proposte per la realizzazione delle interfacce con il rifiuto che possano fornire un utile contributo alla progettazione.

4.3 Uso di rifiuto selezionato come filtro

Come già in altri campi dell'ingegneria civile, anche nelle discariche si è assistito negli ultimi anni a un crescente impiego dei filtri in geotessile a scapito di quelli in materiale granulare, pur permanendo ad oggi delle riserve sulla compatibilità o meno della durabilità di tali dispositivi con la vita utile della discarica. I filtri in materiale granulare rimangono comunque la scelta più

adeguata all'interfaccia tra rifiuto e strato per il drenaggio del percolato. L'elevata concentrazione di materiale in sospensione, anche di origine organica, contenuto nel percolato porta infatti il filtro ad operare in condizione particolarmente gravose (Koerner *et al.*, 1994). L'aggressività dell'ambiente in cui viene ad operare il filtro e l'impossibilità di provvedere a una sua sostituzione in caso di malfunzionamento, impongono cautela nella scelta della tipologia di filtro adottata, sconsigliando l'impiego di filtri sintetici.

Sia i filtri in geotessile che i filtri in materiale granulare, considerata la rilevante estensione dell'area destinata allo stoccaggio dei rifiuti, rappresentano delle considerevoli voci di spesa nella realizzazione della discarica, da una parte per il costo del geotessuto, mentre dall'altra, a fronte di una maggiore economicità del materiale quando disponibile nelle vicinanze, il maggiore ingombro determina una cospicua riduzione del volume utile da destinare al conferimento del rifiuto.

Una possibile soluzione è quella di impiegare rifiuti opportunamente selezionati per soddisfare le proprietà richieste agli strati filtranti. In tale ottica, tra i materiali che suscitano maggiore interesse per i quantitativi da smaltire, vi sono i detriti di risulta delle demolizioni edilizie e le sabbie di fonderia esauste. La volontà da parte del produttore di tali materiali di disfarsi di essi non solo comporta l'annullamento dei costi di approvvigionamento, ma anzi il gestore della discarica riceve un contributo per il loro smaltimento, che comunque avverrebbe in altre posizioni all'interno del cumulo di rifiuti. In tal modo dunque il volume di discarica destinato ad accogliere gli strati filtranti e di regolarizzazione è comunque impiegato per il conferimento di rifiuto.

Gli svantaggi nell'uso di tali materiali sono principalmente legati alla loro disponibilità, che può essere incostante, e alla non uniformità delle loro proprietà ingegneristiche dovuta alla provenienza da diversi siti e impianti produttivi (McNally, 1998). Tali materiali sono comunque raramente utilizzabili tal quali: per raggiungere le proprietà di compatibilità granulometrica e sta-

bilità interna che gli sono richiesti per essere utilizzati come filtri necessitano, nella maggior parte dei casi, di essere sottoposti a processi di vagliatura e/o miscelazione tra loro o con materiali granulari di provenienza tradizionale.

4.4 Modellazione geotecnica dei rifiuti

Lo studio della compatibilità granulometrica e della stabilità interna degli strati che costituiscono la copertura e il fondo della discarica non può prescindere dalla conoscenza delle distribuzioni granulometriche di questi. Mentre per gli strati che costituiscono le barriere impermeabili la determinazione della curva granulometrica è abbastanza semplice, tale compito è più complesso per il cumulo di rifiuti a causa dell'intrinseca disomogeneità di tale materiale. La modellazione del rifiuto richiede quindi delle forti approssimazioni. Lo studio della composizione del rifiuto permette di determinare un fuso granulometrico all'interno del quale è più probabile ricada la curva granulometrica.

4.4.1 Composizione

I rifiuti solidi urbani (RSU) sono per loro natura estremamente eterogenei, sono costituiti prevalentemente da scarti di origine alimentare, ramaglie, prodotti cartacei, plastica, gomma, ceneri e rifiuti da pulitura delle strade. La composizione del materiale conferito non varia solo da una discarica ad un'altra in funzione del bacino di utenza che questa serve, ma anche all'interno di una stessa discarica. Come è possibile osservare in figura 4.3, la composizione media del rifiuto è fortemente mutata nel corso degli anni (Dixon e Jones, 2005; Burnley, 2007). Grazie all'introduzione della raccolta differenziata e allo sviluppo degli impianti di incenerimento, la composizione del rifiuto oggi destinato alla discarica si attesta principalmente sulla frazione secca residua e sulle scorie pesanti da incenerimento.

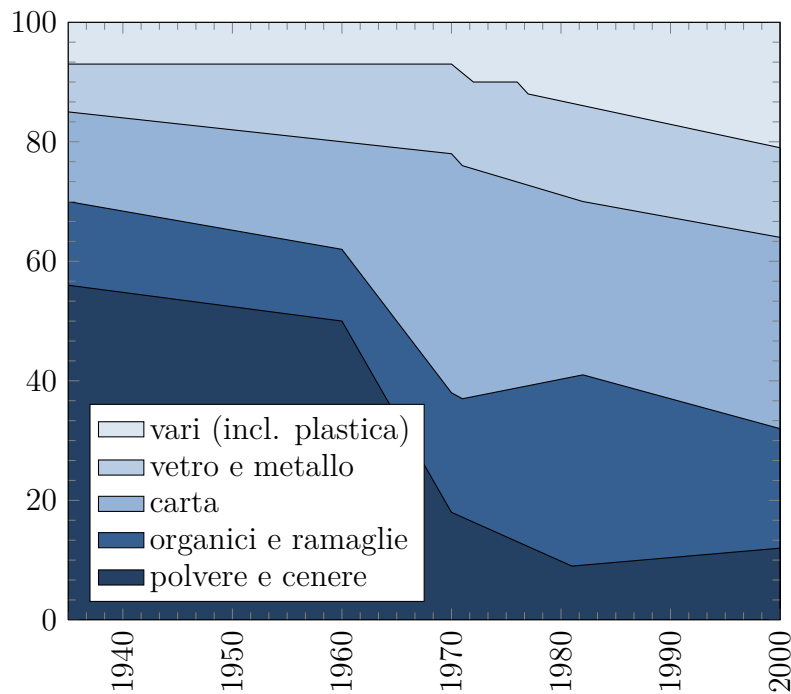


Figura 4.3: Composizione del rifiuto solido urbano in Gran Bretagna dal 1935 al 2000, (Watts *et al.*, 2002)

Prima di essere conferito in discarica il rifiuto è assoggettato a dei trattamenti che mirano alla separazione del materiale riutilizzabile da quello non riutilizzabile. Le tecniche adottate sono diverse a seconda che il rifiuto provenga da raccolta differenziata o meno. Fra i trattamenti eseguiti (De Stefanis *et al.*, 2009) si hanno:

- riduzione dimensionale attraverso triturazione;
- vagliatura con separazione del materiale in base a dimensione e/o densità;
- separazione in base a proprietà elettrostatiche e/o ottiche;
- cernita manuale;

- essiccamento.

Successivamente il rifiuto destinato alla discarica può essere compattato attraverso delle presse e confezionato in balle trattenute da filo di ferro oppure può essere conferito sciolto all'interno del cumulo di rifiuti.

4.4.2 Distribuzione granulometrica

Gli elementi che costituiscono i rifiuti possono essere classificati, a seconda della forma prevalente, in (Collins e Kölsch, 1993):

- granulari, non esiste una dimensione predominante;
- filiformi, una dimensione è prevalente sulle altre;
- fogli, due dimensioni prevalenti rispetto alla terza;
- scatolari, tutte e tre le dimensioni sono rilevanti e non trascurabili.

La possibilità di usare le principali teorie per la determinazione della compatibilità granulometrica e della stabilità interna viste nei precedenti capitoli richiede di approssimare il rifiuto a un materiale costituito da particelle di forma sferica.

La curva di distribuzione granulometrica del rifiuto può essere valutata eseguendo una setacciatura di campioni di rifiuto destinati alla discarica. La curva così determinata non rimane tuttavia costante una volta che il rifiuto è posto nella discarica principalmente a causa della decomposizione della frazione biodegradabile. A causa di ciò il rifiuto di maggiore età presenta una curva granulometrica più concentrata sulle frazioni fini. *Machado et al.* (2010) hanno eseguito delle prove di setacciatura su campioni di rifiuto di diverse età estratti dall'interno di una discarica, analoghi studi sono stati fatti anche da *Jessberger* (1994). Considerata l'elevata disomogeneità e variabilità del rifiuto è opportuno considerare, piuttosto che una singola curva di distribuzione granulometrica, un fuso nel piano semilogaritmico all'interno

del quale questa possa ricadere con un certo livello di confidenza. Studi in tale senso sono stati fatti da *Jessberger* (1994), i cui risultati sono rappresentati in figura 4.4 insieme ad alcune curve determinate sperimentalmente per rifiuti di diversa età. Nei prossimi capitoli l'applicazione delle teorie presentate nei capitoli 2 e 3, nel coinvolgere il materiale costituente il rifiuto, farà riferimento a delle curve granulometriche contenute in tale fuso e scelte seguendo il criterio di maggior cautelatività. In tale senso nelle verifiche in cui lo strato di rifiuti costituisce il materiale di base si opterà per la curva che delimita superiormente tale fuso, nelle verifiche dove lo strato di rifiuti costituisce invece il materiale filtrante si sceglierà la curva che ne costituisce il limite inferiore.

Alcuni studi (Ruf, 1974) hanno mostrato che esiste una differenza abbastanza marcata nelle curve granulometriche che caratterizzano le diverse componenti del rifiuto. Ciascuna di tali componenti presenta differenti valori del peso specifico medio. A rigore non sarebbe dunque corretto effettuare la trasformazione da distribuzione granulometrica in base al peso a distribuzione granulometrica in base alla superficie delle particelle, o in base alla numerosità di queste, assumendo l'ipotesi di densità costante. Tuttavia la forte disomogeneità che caratterizza il rifiuto, l'influenza dei processi di trattamento e di posa in discarica e la difficoltà di considerare altri parametri quali per esempio la compressibilità del rifiuto hanno determinato la necessità di trascurare la variabilità della densità nelle applicazioni trattate in questa tesi.

4.5 Caratteristiche dello strato di barriera minerale

La barriera minerale posta in copertura ha il compito di isolare il rifiuto dall'ambiente esterno, limitare l'infiltrazione dell'acqua meteorica all'interno della discarica e impedire la dispersione del biogas nell'ambiente. Affinché la

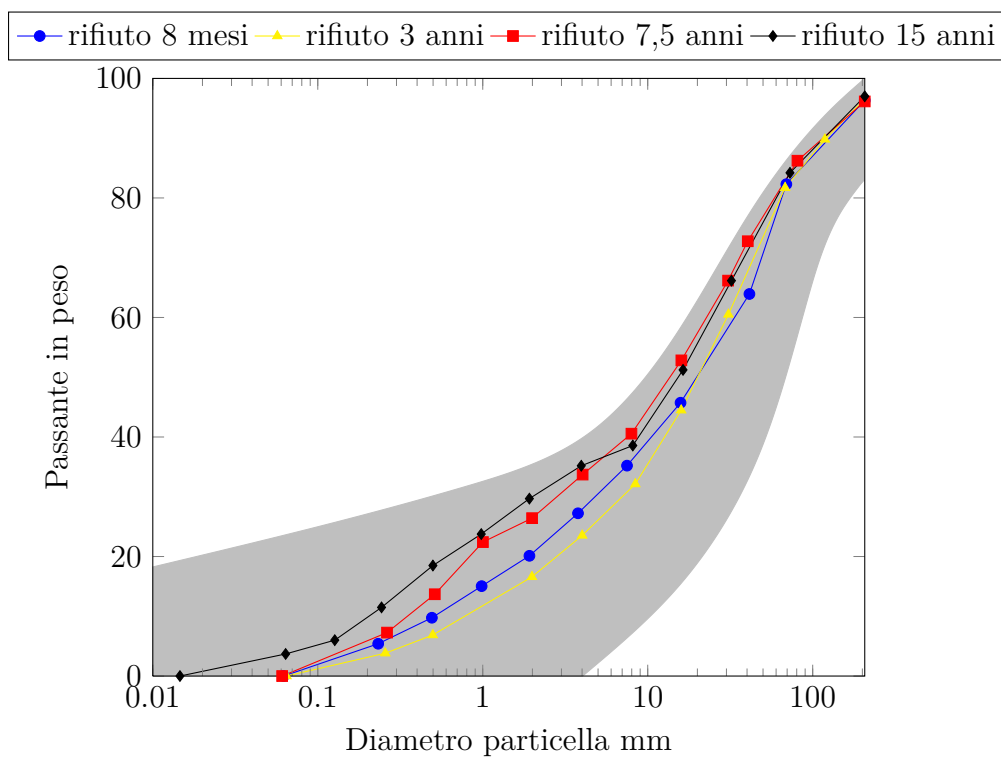


Figura 4.4: Curve granulometriche ottenute da campioni di rifiuto di diverse età e fuso individuato da Jessberger (1994).

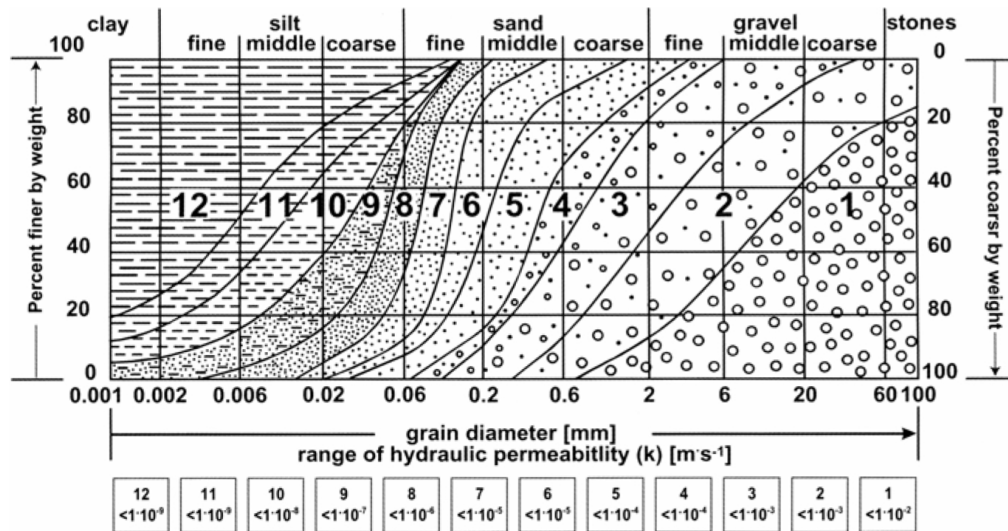


Figura 4.5: Corrispondenza tra distribuzione granulometrica e permeabilità dei materiali impiegati nella realizzazione della barriera minerale (Alamgir *et al.*, 2005).

barriera minerale sia in grado di svolgere tali funzioni il Decreto Legislativo 36/2003 fissa dei valori di conducibilità idraulica massima per il materiale di cui è costituita. Sebbene tali prescrizioni non riguardino le discariche per rifiuti inerti, nelle applicazioni trattate nei successivi capitoli si supporrà, anche per tali tipi di discarica, una granulometria della barriera minerale che rispetti tali limiti di permeabilità.

Lo studio dei problemi di erosione connessi ai moti di filtrazione con le teorie presentate nei precedenti capitoli richiede la conoscenza delle curve di distribuzione granulometrica dei materiali coinvolti. Per determinare la granulometria con cui trattare la barriera minerale è possibile ricorrere al grafico tracciato da Alamgir (2005), qui riportato in figura 4.5, che individua in maniera empirica dei fusi granulometrici cui è associato un certo valore di conducibilità idraulica.

Capitolo 5

Progettazione del pacchetto di copertura

I criteri che guidano la progettazione del pacchetto di copertura devono garantire il mantenimento nel corso del tempo delle granulometrie e delle proprietà idrauliche degli strati che lo costituiscono. Si deve quindi verificare che non avvengano fenomeni di erosione e trasporto di particelle con conseguente depauperazione della barriera minerale e, nel caso di discariche diverse da quelle esclusivamente destinate ad accogliere rifiuti non biogassificabili, intasamento dello strato destinato al drenaggio del biogas.

Nel corso del capitolo dapprima si valuteranno le caratteristiche idrauliche da assegnare agli elementi del pacchetto di copertura a contatto con il rifiuto, in seguito si analizzeranno differenti soluzioni progettuali con cui tali elementi possono essere realizzati, verificando nei diversi casi quali sono le prestazioni ottenute sia in termini di compatibilità granulometrica che di funzionalità idraulica.

5.1 Trasmissività richiesta per il drenaggio del biogas

Nelle discariche per rifiuti solidi urbani pericolosi/non pericolosi gli strati di materiale granulare posti all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto devono svolgere, oltre alla funzione filtrante e alla funzione di regolarizzazione, anche quella di drenaggio del biogas. È quindi essenziale che tali strati siano caratterizzati da una conducibilità idraulica sufficiente per assolvere a tale compito. Inoltre è necessario effettuare una stima del quantitativo di biogas prodotto nella discarica per poter giungere a un corretto dimensionamento degli strati drenanti.

La portata di biogas dipende da un gran numero di variabili, tra cui le più importanti sono: la tipologia di rifiuto conferito, l'età della discarica, la temperatura, l'umidità, le modalità di captazione, la pressione atmosferica. Gli studi effettuati da *Thiel* (1998) hanno permesso di stimare un rapporto di produzione del biogas $r_g = 6,24 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}/\text{anno}$. Tale parametro indica il volume di biogas, a pressione atmosferica e temperatura ambiente, che si genera in un anno da un chilogrammo di rifiuto.

La portata di biogas prodotto per unità di superficie q_{LFG} può essere valutata con la relazione:

$$q_{LFG} = r_g \cdot H_{waste} \cdot \gamma_{waste} \quad (5.1)$$

dove H_{waste} è l'altezza del cumulo di rifiuti, mentre γ_{waste} è il peso specifico del rifiuto conferito, che generalmente può essere assunto pari a $0,8 \text{ ton}/\text{m}^3$.

Utilizzando la precedente relazione è possibile valutare la trasmissività θ_{LFG} richiesta per lo strato di drenaggio del biogas tramite la formula:

$$\theta_{LFG} = \frac{q_{LFG} \gamma_{LFG}}{u_{g,max}} \left(\frac{L^2}{8} \right) \quad (5.2)$$

dove γ_{LGF} è il peso specifico del biogas, $u_{g,max}$ è la massima pressione del biogas ammessa e L è il passo tra i pozzi di aspirazione.

La trasmissività così determinata va incrementata attraverso una serie di coefficienti di sicurezza:

$$\theta_{LFG,d} = \theta_{LFG} \cdot FS \cdot RF_{in} \cdot RF_{cr} \cdot RF_{cc} \cdot RF_{bc} \quad (5.3)$$

dove:

- FS è un fattore di sicurezza globale, legato all'incertezza del modello adottato;
- RF_{in} è un fattore di riduzione da intrusione;
- RF_{cr} è un fattore di riduzione da *Creep*;
- RF_{cc} è un fattore di riduzione da intasamenti di tipo chimico;
- RF_{bc} è un fattore di riduzione da intasamenti di tipo biologico.

Per tali coefficienti di sicurezza possono adottarsi i valori reperibili in letteratura i cui intervalli di variazione sono riportati in tabella 5.1 Il fattore di sicurezza complessivo determinato utilizzando tali valori varia tra $FS_{tot,min} = 2,64$ e $FS_{tot,max} = 9,072$.

FS	$1,0 \div 1,2$
RF_{in}	$1,1 \div 1,4$
RF_{cr}	$1,0 \div 1,2$
RF_{cc}	$1,2 \div 1,5$
RF_{bc}	$2,0 \div 3,0$

Tabella 5.1: Intervalli di variazione da letteratura dei coefficienti di sicurezza che compaiono nella formula 5.3

La conversione della trasmissività al biogas $\theta_{LFG,d}$ in trasmissività idraulica $\theta_{H_2O,d}$ può essere conveniente per svolgere la progettazione impiegando

le relazioni relative al flusso liquido. La relazione da impiegare nel passaggio da $\theta_{LFG,d}$ a $\theta_{H_2O,d}$ è la seguente:

$$\theta_{H_2O,d} = \frac{\mu_{LFG}}{\mu_{H_2O}} \frac{\gamma_{LFG}}{\gamma_{H_2O}} \theta_{LFG,d} \quad (5.4)$$

dove con μ_{LFG} e μ_{H_2O} si indicano rispettivamente la viscosità dinamica del biogas e dell'acqua, mentre γ_{LFG} e γ_{H_2O} sono i pesi specifici rispettivamente del biogas e dell'acqua. I valori caratteristici di tali parametri a una temperatura di 20°C sono riportati in tabella 5.2

	Densità kg/m ³	Peso specifico N/m ³	Viscosità dinamica Ns/m ²	Viscosità cinematica m ² /s
Acqua	1000	9800	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$
Aria	1,2	11,8	$1,79 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$
Anidride carbonica	1,83	17,9	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$8,21 \cdot 10^{-6}$
Metano	0,67	6,54	$1,10 \cdot 10^{-5}$	$1,65 \cdot 10^{-5}$
LFG (55% CO ₂ -45% CH ₄)	1,31	12,8	$1,32 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$

Tabella 5.2: Valori caratteristici di alcuni fluidi a 20°C

Utilizzando le relazioni finora presentate è possibile quindi valutare la trasmissività idraulica equivalente richiesta per lo strato di drenaggio del biogas in diverse configurazioni. In figura 5.1 è tracciato il grafico che rappresenta, assunta una pressione massima del biogas pari a 2 KPa, l'andamento della trasmissività idraulica equivalente richiesta al variare dell'altezza del rifiuto e del passo tra i pozzi di aspirazione.

Per verificare se la granulometria e lo spessore assegnati allo strato drenante sono idonei per dirigere il biogas verso i pozzi di aspirazione può essere utilizzata la formula di *Kozeny-Carman*, la quale permette di determinare la conducibilità idraulica k di un terreno nota la granulometria, la porosità n e

la viscosità cinematica ν del fluido che permea attraverso di esso:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot 8,3 \cdot 10^{-3} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_{10}^2 \quad (5.5)$$

dove g è l'accelerazione di gravità mentre d_{10} è il diametro cui corrisponde un passante del materiale pari al 10%. Tale espressione non è utilizzabile per materiali argillosi e inizia a perdere di validità con d_{10} superiori ai 3 mm (Odong, 2007).

5.2 Confronto tra le possibili soluzioni progettuali

Le configurazioni di seguito analizzate e schematizzate in figura 5.2 sono quelle di:

- Barriera minerale a diretto contatto con il rifiuto (figura 5.2a)
- Filtro costituito da un singolo strato di materiale granulare posto tra la barriera minerale e il rifiuto (figura 5.2b)
- Filtro costituito da un doppio strato di materiale granulare posto tra la barriera minerale e il rifiuto (figura 5.2c)
- Filtro costituito da un triplo strato di materiale granulare posto tra la barriera minerale e il rifiuto (figura 5.2d)
- Filtro in geotessile posto all'interfaccia tra la barriera minerale e il rifiuto (figura 5.2e)
- Filtro costituito da uno strato di materiale granulare affiancato superiormente da un geotessile e posto tra la barriera minerale e il rifiuto (figura 5.2f)

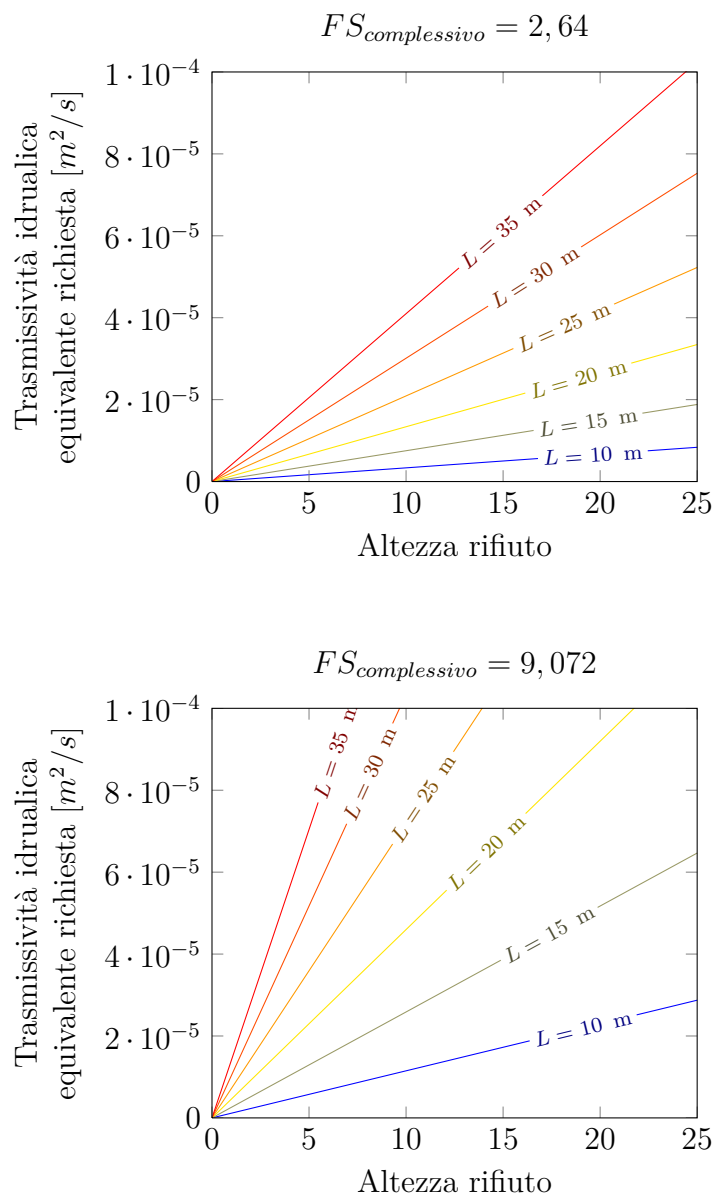


Figura 5.1: Andamento della trasmissività idraulica equivalente richiesta al variare dell'altezza del rifiuto e del passo L tra i pozzi di aspirazione per una pressione massima ammissibile del biogas di 2 KPa

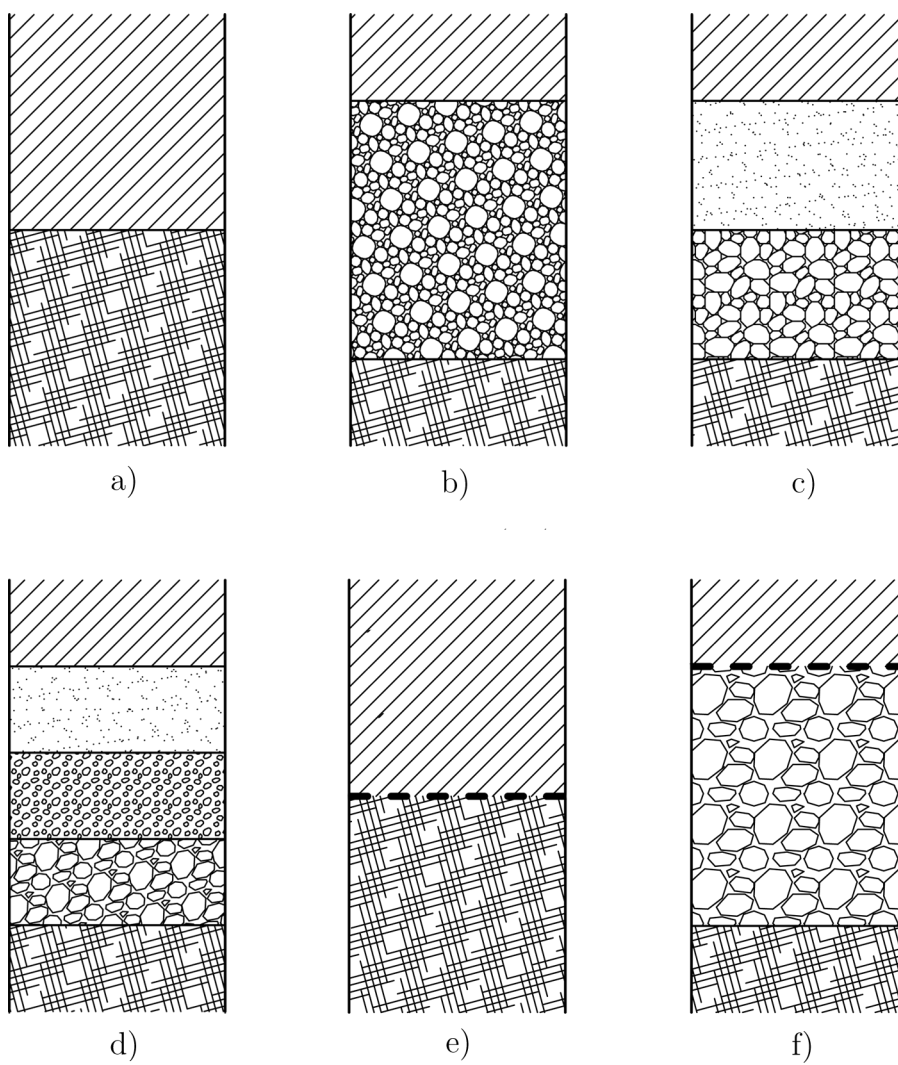


Figura 5.2: Soluzioni progettuali analizzate per il pacchetto di copertura

A seconda della tipologia del rifiuto conferito nella discarica, la verifica di conducibilità idraulica del materiale che costituisce l'interfaccia tra rifiuto e copertura può essere necessaria oppure no. Per tale ragione alcune delle soluzioni di seguito presentate possono rivelarsi valide per discariche per rifiuti non biogassificabili e non esserlo per discariche per rifiuti biogassificabili in cui sorge la necessità di provvedere all'allontanamento del biogas prodotto.

Nell'eseguire le verifiche di compatibilità granulometrica si assumerà come curva di distribuzione granulometrica del rifiuto quella che costituisce il limite inferiore del fuso tracciato da *Jessberger* (figura 4.4). Nel trattare il problema della filtrazione, tale curva, essendo caratterizzata da particelle più grossolane e conseguentemente vuoti più grandi, è quella più critica nella descrizione del rifiuto come strato filtrante. In tale configurazione la ritenzione delle particelle erose del materiale di base risulta infatti più difficoltosa, pertanto la verifica è maggiormente cautelativa.

5.2.1 Barriera minerale a contatto diretto con il rifiuto

Nelle discariche per rifiuti pericolosi e non pericolosi la normativa prevede la realizzazione di uno strato destinato al drenaggio del biogas di spessore pari ad almeno 0,5 m all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto. La possibilità per tali tipologie di discarica di porre a diretto contatto il materiale che costituisce la barriera minerale con il rifiuto è preclusa alla luce dell'impossibilità di provvedere a un idoneo sistema di drenaggio del biogas prodotto nella decomposizione del rifiuto conferito.

In discariche per rifiuti inerti, dove la formazione del biogas non è possibile, l'esecuzione di analisi di compatibilità granulometrica tra barriera minerale e rifiuto mostra comunque l'impossibilità di porre a diretto contatto tali strati. Applicando il metodo di *Terzaghi* si trova un rapporto $D_{15}/d_{85} = 217$, assai superiore al valore limite di 4. Le analisi svolte secondo il metodo di *Musso e Federico* (corretto con le osservazioni di *Humes e Locke et al.*), impostando un livello di confidenza del 95% e ipotizzando per il rifiuto una

densità relativa dello 0%, mostrano che non esistono all'interno del rifiuto costrizioni sufficientemente minute da arrestare le particelle che costituiscono la barriera minerale. Come è possibile notare dal grafico in figura 5.3, la curva di distribuzione granulometrica del materiale che costituisce la barriera minerale si mantiene infatti sempre a sinistra della verticale condotta per l'estremo inferiore della curva di distribuzione delle costrizioni all'interno del rifiuto.

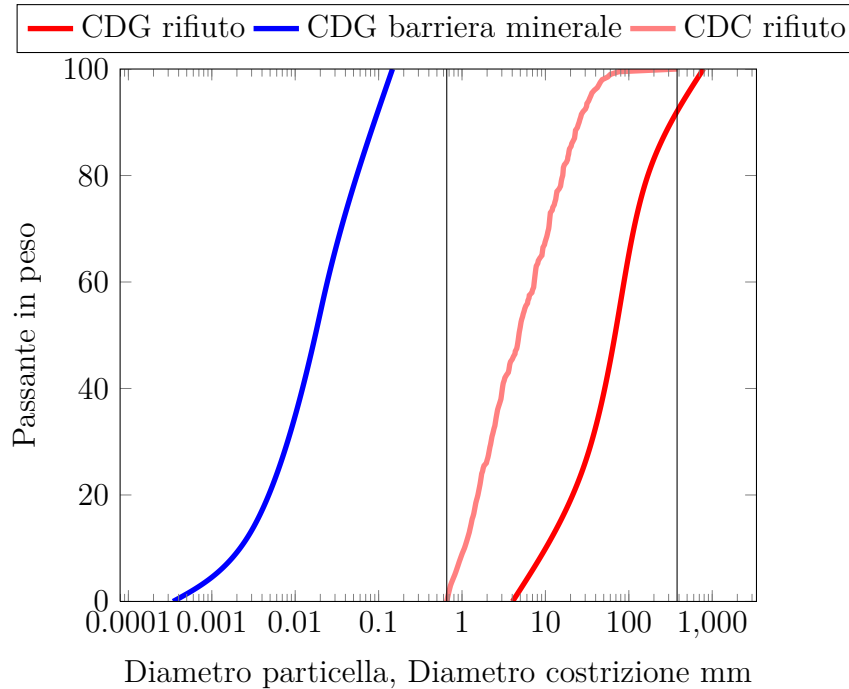


Figura 5.3: Curve di distribuzione granulometrica e curva di distribuzione delle costrizioni per la valutazione della compatibilità granulometrica tra barriera minerale e rifiuto in assenza di filtri.

5.2.2 Singolo strato di materiale granulare tra barriera minerale e rifiuto

Come è possibile osservare dalle curve di distribuzione granulometrica riportate nel grafico di figura 5.3, tra i diametri più piccoli delle particelle del materiale di base e del materiale che costituisce il rifiuto vi è una differenza di circa quattro ordini di grandezza.

Per un materiale granulare che si trovi nella configurazione di massimo addensamento, la costrizione più piccola è quella che si crea tra tre particelle di diametro minimo disposte secondo un reticolo tetraedrico. La dimensione della costrizione minima $D_{c,min}$ in tal caso è data da:

$$D_{c,min} = 0,1547 \cdot D_{min} \quad (5.6)$$

dove D_{min} è il diametro della particella più piccola che costituisce il materiale granulare.

La rilevante differenza tra le curve di distribuzione granulometrica della barriera minerale e del rifiuto fa sì che un singolo strato di materiale granulare posto all'interfaccia non sia in grado di fornire costrizioni sufficientemente minute da arrestare le particelle più piccole della barriera minerale e al contempo essere costituito da particelle sufficientemente grossolane da essere trattenute dalle costrizioni che si formano nel rifiuto.

Quando il materiale di base è internamente stabile non è tuttavia strettamente necessario che esistano, nello strato filtrante, ritenzioni di diametro inferiore a quello della particella più piccola del materiale di base affinché questa non sia erosa. La maggior parte di tali particelle sono infatti trattenute all'interno dello stesso materiale di base dove, tra le particelle più grossolane attraverso cui vengono trasferiti gli sforzi tensionali, si formano delle ritenzioni sufficientemente minute da arrestare la frazione fine. Nei materiali internamente stabili il fenomeno erosivo è quindi limitato alla frazione fine più vicina all'interfaccia dove si realizzano degli effetti arco. Quando tale

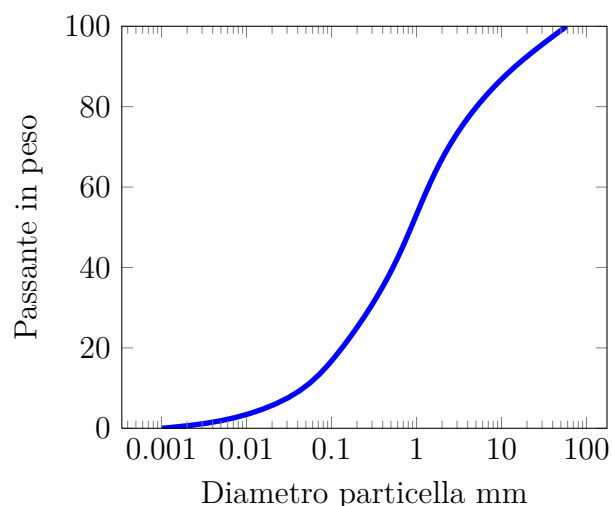


Figura 5.4: Curva granulometrica per il filtro a strato singolo posto all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto nel pacchetto di copertura.

frazione fine si esaurisce il fenomeno erosivo si estingue senza propagarsi alla parte superiore dello strato (Lafleur, 1989). Una volta verificata la stabilità interna del materiale di base, è quindi sufficiente che lo strato filtrante ne trattienga la porzione più grossolana, essendone la frazione fine già trattenuta prima di giungere ad esso.

In figura 5.4 è tracciata una possibile curva di distribuzione granulometrica del materiale granulare posto all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto che sarà assunta come riferimento nelle analisi di seguito presentate. La scelta di tale curva di distribuzione granulometrica è dettata dall'esigenza di disporre, nel materiale che costituisce il filtro a contatto con la barriera minerale, di costrizioni di dimensioni inferiori a quelle delle particelle più fini che costituiscono il materiale di base. La stabilità interna della barriera minerale è infatti difficilmente ottenibile, sia per i costi che sarebbe necessario sostenere per disporre di una granulometria *ad hoc* per tale materiale, sia per la possibile formazione di fessure autosostenentesi nella barriera minerale che ne renderebbero inutile la stabilità interna.

L'analisi di stabilità interna del materiale secondo il criterio proposto

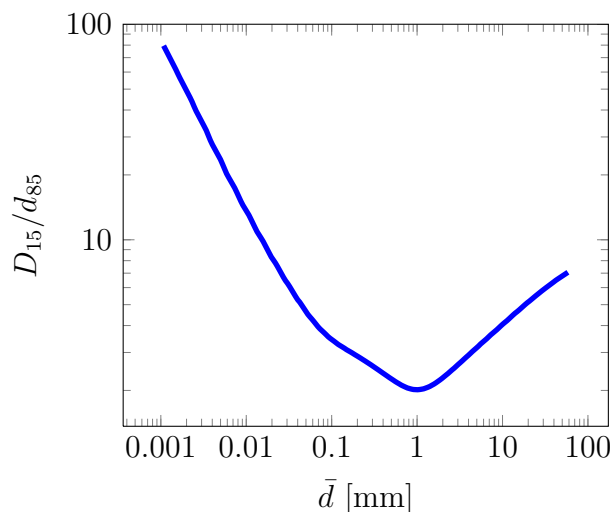


Figura 5.5: Analisi della stabilità interna secondo il criterio di *Kezdi* per il filtro a strato singolo posto all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto nel pacchetto di copertura.

da *Kezdi* mostra (figura 5.5) come la frazione fine sia caratterizzata da un rapporto D_{15}/d_{85} sensibilmente superiore a 4. Secondo tale metodo quindi il materiale non è internamente stabile.

Secondo il criterio proposto da *Kenney* e *Lau*, che per curve granulometriche estese, come già accennato nel capitolo 3, offre una distinzione più corretta fra materiali stabili e instabili, la curva granulometrica adottata risulta invece verificata contro l'instabilità interna, come è possibile osservare nel grafico di figura 5.6.

Dalla curva di distribuzione granulometrica è possibile ricavare il diametro corrispondente a un passante del 15%, $D_{15} = 0,08512\text{mm}$, e il diametro corrispondente a un passante dell'85%, $d_{85} = 8,27999\text{mm}$. Il criterio di *Terzaghi* fornisce quindi per l'interfaccia tra barriera minerale e filtro un rapporto $D_{15}/d_{85} = 1,22693$, mentre per l'interfaccia tra filtro e rifiuto si ha un rapporto $D_{15}/d_{85} = 1,81545$. Il criterio risulta quindi rispettato in entrambi i casi.

Le analisi di compatibilità granulometrica secondo il metodo di *Musso* e

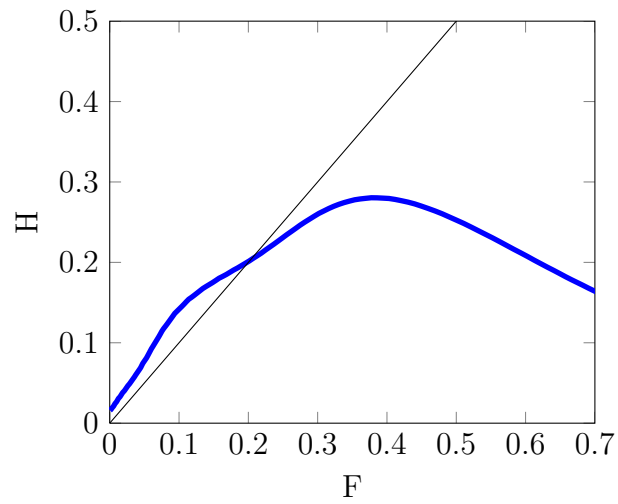


Figura 5.6: Analisi della stabilità interna secondo il criterio di *Kenney* e *Lau* per il filtro a strato singolo posto all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto nel pacchetto di copertura.

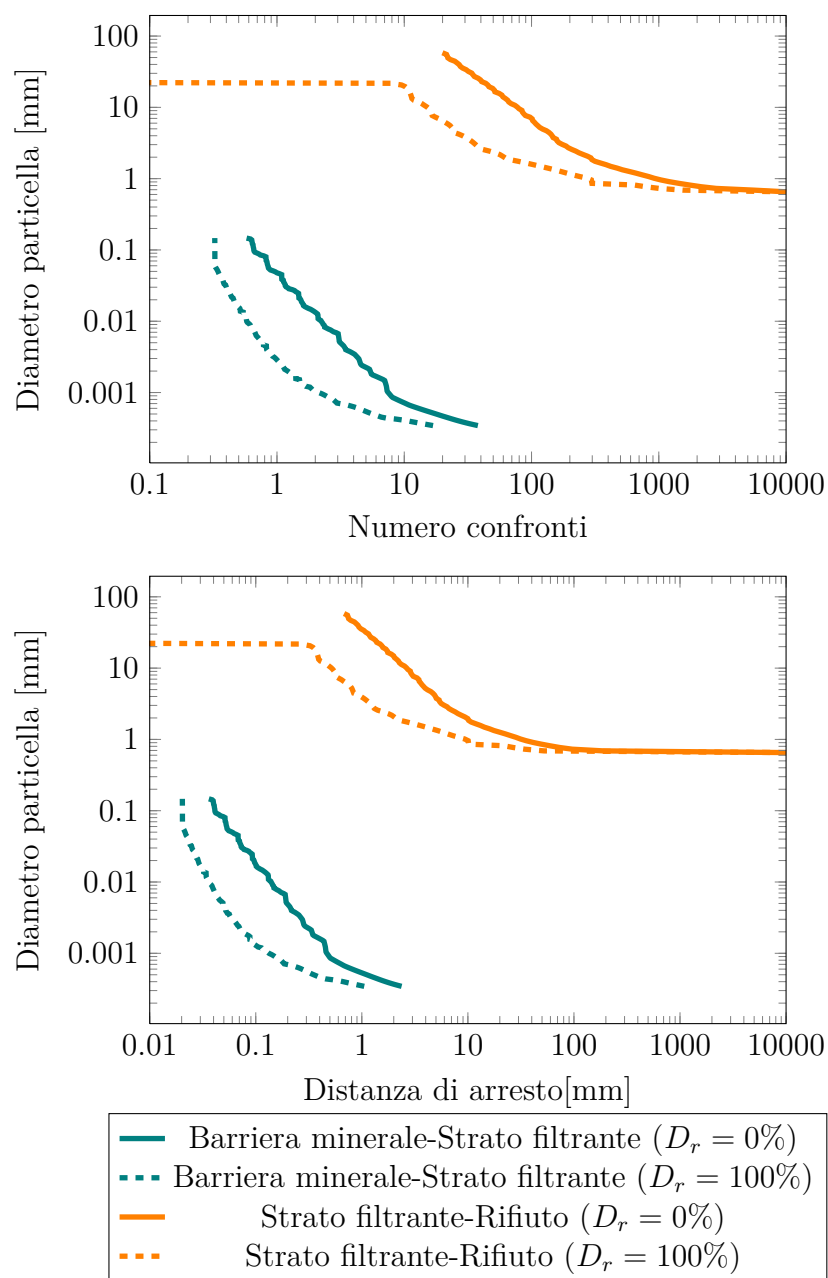


Figura 5.7: Analisi di compatibilità granulometrica secondo il metodo di *Musso e Federico* per un filtro a strato singolo per il pacchetto di copertura all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto.

Federico (corretto con le osservazioni di *Humes* e *Locke et al.*) sono state svolte adottando un livello di confidenza del 95%. Come è possibile notare nel grafico di figura 5.7 le particelle appartenenti al filtro di diametro inferiore a circa 0,69 mm non trovano all'interno del cumulo di rifiuti costrizioni sufficientemente minute da arrestarle. È quindi necessario ammettere l'erosione di parte di queste particelle, che in totale rappresentano una percentuale in peso pari a circa il 45% del materiale che costituisce il filtro, fintanto che tale fenomeno non si esaurisce autonomamente quando in prossimità dell'interfaccia si formano una serie di effetti arco che trattengono la frazione fine. Si può notare che, con il livello di confidenza assunto, anche parte delle particelle più grossolane richiedono alcuni confronti prima di essere arrestate, potendo quindi compiere un certo percorso all'interno del rifiuto. Si forma quindi una zona di transizione dove possono formarsi gli effetti arco di cui prima e in cui sono presenti sia particelle del materiale granulare che costituisce il filtro, sia particelle di rifiuto.

Esaminando l'interazione tra barriera minerale e filtro si osserva che la curva granulometrica adottata è tale da arrestare, con un livello di confidenza del 95%, anche le particelle più piccole del materiale base entro distanze molto contenute.

Qualora si intenda utilizzare la soluzione progettuale di filtro costituito da un singolo strato di materiale granulare in discariche per rifiuti pericolosi/non pericolosi è necessario verificare che questo garantisca una conducibilità idraulica sufficiente ad assolvere alle funzioni di drenaggio del biogas. Dalla curva di distribuzione granulometrica si ricava un diametro corrispondente a un passante del 10% pari a 0,04690 mm. Applicando la relazione di *Kozeny-Carman* si ottiene una conducibilità idraulica pari a $k = 7,25 \cdot 10^{-5}$ m/s nella configurazione a massima densità con porosità $n = 0,48$ e di $k = 5,69 \cdot 10^{-6}$ m/s nella configurazione a minima densità e porosità $n = 0,26$.

Ipotizzando un passo tra i pozzi di captazione del biogas di 25 metri, un'altezza del cumulo di rifiuti di 15 metri e una pressione massima ammis-

sibile del biogas pari a 2 KPa, dalle relazioni del paragrafo 5.1, è possibile calcolare con il fattore di sicurezza complessivo massimo una trasmissività idraulica equivalente richiesta pari a $1,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, mentre con il fattore di sicurezza complessivo minimo questa si riduce a $3,14 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Assegnando all'elemento filtrante uno spessore di 50 centimetri i valori di trasmissività raggiunti sono di $3,62 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ nella configurazione a minima densità e di $2,84 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ nella configurazione a massima densità, non risultano pertanto sufficienti a un efficace drenaggio del biogas. Allo spessore da assegnare allo strato adibito al drenaggio del biogas andrebbe inoltre aggiunto un franco, che dipende dal percorso che possono compiere all'interno del filtro le particelle più fini del materiale che costituisce la barriera minerale, necessario per garantire il mantenimento della trasmissività idraulica del drenaggio anche a fronte della sua parziale occlusione per effetto della migrazione delle particelle appartenenti al materiale di base.

5.2.3 Doppio strato di materiale granulare tra barriera minerale e rifiuto

Se la soluzione di filtro granulare costituito da un singolo strato può essere valida per le discariche per rifiuti inerti non lo è invece per discariche per rifiuti pericolosi/non pericolosi a causa dell'eccessivo ingombro necessario per raggiungere le proprietà idrauliche desiderate. Per ridurre lo spessore del filtro garantendo al contempo la trasmissività richiesta per il drenaggio del biogas è necessario ricorrere a una granulometria più grossolana. Ciò è possibile realizzando il filtro all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto in due strati sovrapposti di differente granulometria: a quello superiore è affidato il compito di trattenere le particelle più fini che costituiscono la barriera minerale mentre quello inferiore è deputato al drenaggio del biogas e al raggiungimento della compatibilità granulometrica con il rifiuto.

Le curve di distribuzione granulometrica adottate per i due strati che costituiscono il filtro sono riportate nel grafico di figura 5.8. Per lo strato su-

periore, come già nel caso di filtro a singolo strato, si ritiene opportuno che la curva di distribuzione granulometrica comprenda particelle sufficientemente minute da arrestare anche le frazioni più fini della barriera minerale.

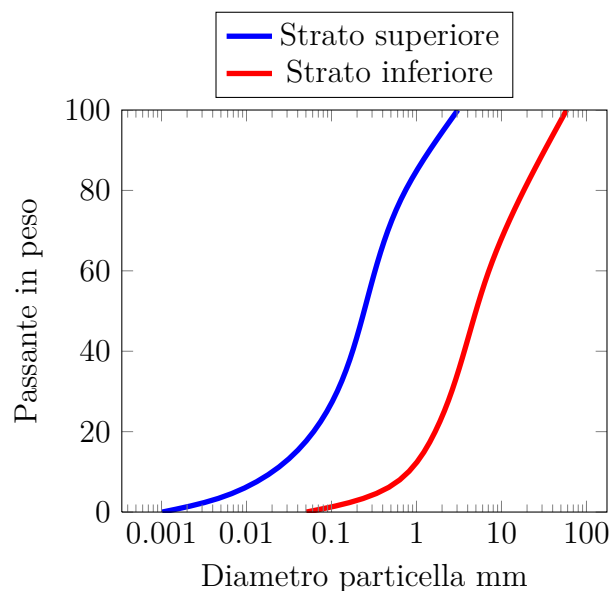


Figura 5.8: Curve granulometriche per il filtro a strato doppio posto all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto nel pacchetto di copertura.

Le analisi di stabilità interna dei materiali che costituiscono i due strati filtranti sono state eseguite secondo il criterio di *Kezdi* e secondo il criterio di *Kenney* e *Lau*. Nel grafico di figura 5.9 è tracciato l'andamento del rapporto D_{15}/d_{85} in funzione del diametro \bar{d} per i due strati che costituiscono il filtro. Si può osservare che il criterio proposto da *Kezdi* non risulta essere verificato per le frazioni fini di entrambi gli strati. Dal grafico di figura 5.10 si osserva invece che il criterio di *Kenney* e *Lau*, più preciso nel determinare la stabilità interna della frazione fine, è invece rispettato sia per lo strato superiore che per lo strato inferiore.

Dalle curve di distribuzione granulometrica è possibile ricavare i diametri corrispondenti ai passanti al 15% e all'85% necessari per eseguire la verifica di compatibilità granulometrica secondo il criterio di *Terzaghi*. Tali valori

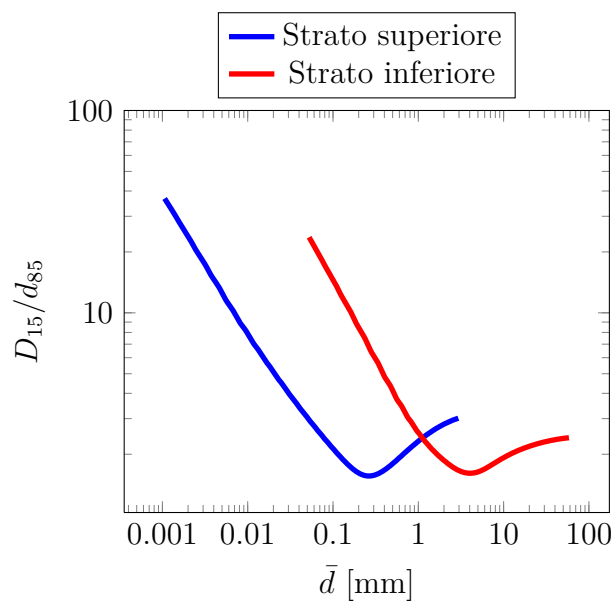


Figura 5.9: Analisi della stabilità interna secondo il criterio di *Kezdi* per il filtro a strato doppio posto all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto nel pacchetto di copertura.

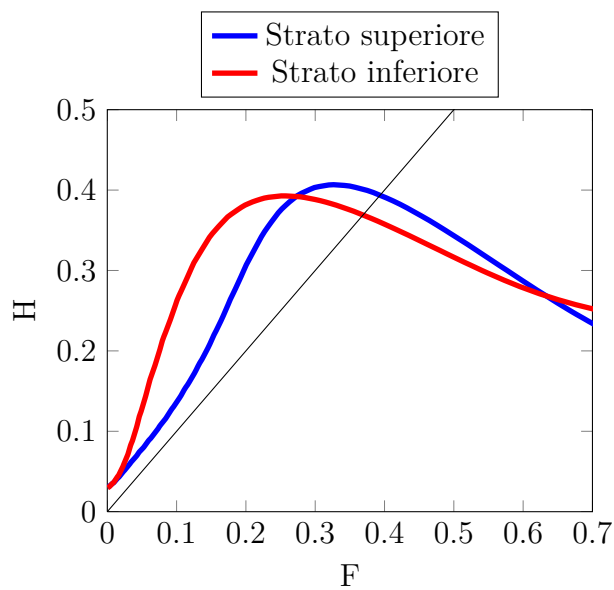


Figura 5.10: Analisi della stabilità interna secondo il criterio di *Kenney* e *Lau* per il filtro a strato doppio posto all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto nel pacchetto di copertura.

	D_{15}	d_{85}	D_{15}/d_{85}
Barriera minerale-Strato superiore	0,03865	0,06938	0,55713
Strato superiore-Strato inferiore	1,23009	1,01239	1,21504
Strato inferiore-Rifiuto	15,03193	24,19787	0,62121

Tabella 5.3: Analisi di compatibilità granulometrica svolte con il metodo di *Terzaghi* per il filtro a due strati

e i rapporti D_{15}/d_{85} calcolati per le diverse interfacce tra barriera minerale, strato filtrante superiore, strato filtrante inferiore e rifiuto sono riportati in tabella 5.3. Si osserva che il criterio di *Terzaghi* è sempre rispettato.

I risultati delle analisi di compatibilità granulometrica secondo il metodo di *Musso e Federico* (corretto con le osservazioni di *Humes e Locke et al.*) sono riportati nel grafico di figura 5.11. Il livello di confidenza assunto in tali analisi è pari al 95%. Si può osservare che anche le particelle più fini della barriera minerale sono arrestate a breve distanza all'interno dello strato superiore del filtro. Per quanto riguarda invece l'interazione tra strato filtrante superiore e strato filtrante inferiore si osserva che le particelle di diametro inferiore a 0,011 millimetri che costituiscono il materiale di base (e che rappresentano meno del 7% in peso di questo) non trovano costrizioni all'interno dello strato inferiore in grado di arrestarle. Una parte di tali particelle potrà quindi essere erosa, tuttavia il fenomeno, come già visto nel caso di filtro a strato singolo, riguarda solamente le particelle più vicine all'interfaccia con il filtro inferiore. Le particelle più distanti da questa sono arrestate dalle costrizioni che si generano all'interno dello stesso filtro superiore tra le particelle più grossolane che lo costituiscono. Lo stesso fenomeno si ha all'interfaccia tra strato filtrante inferiore e rifiuto, dove a non trovare costrizioni sufficientemente minute all'interno del rifiuto sono le particelle di dimensione inferiore a 0,66 millimetri (che rappresentano meno del 9% in peso del materiale che costituisce il filtro inferiore).

Dalla curva granulometrica del materiale che costituisce lo strato filtran-

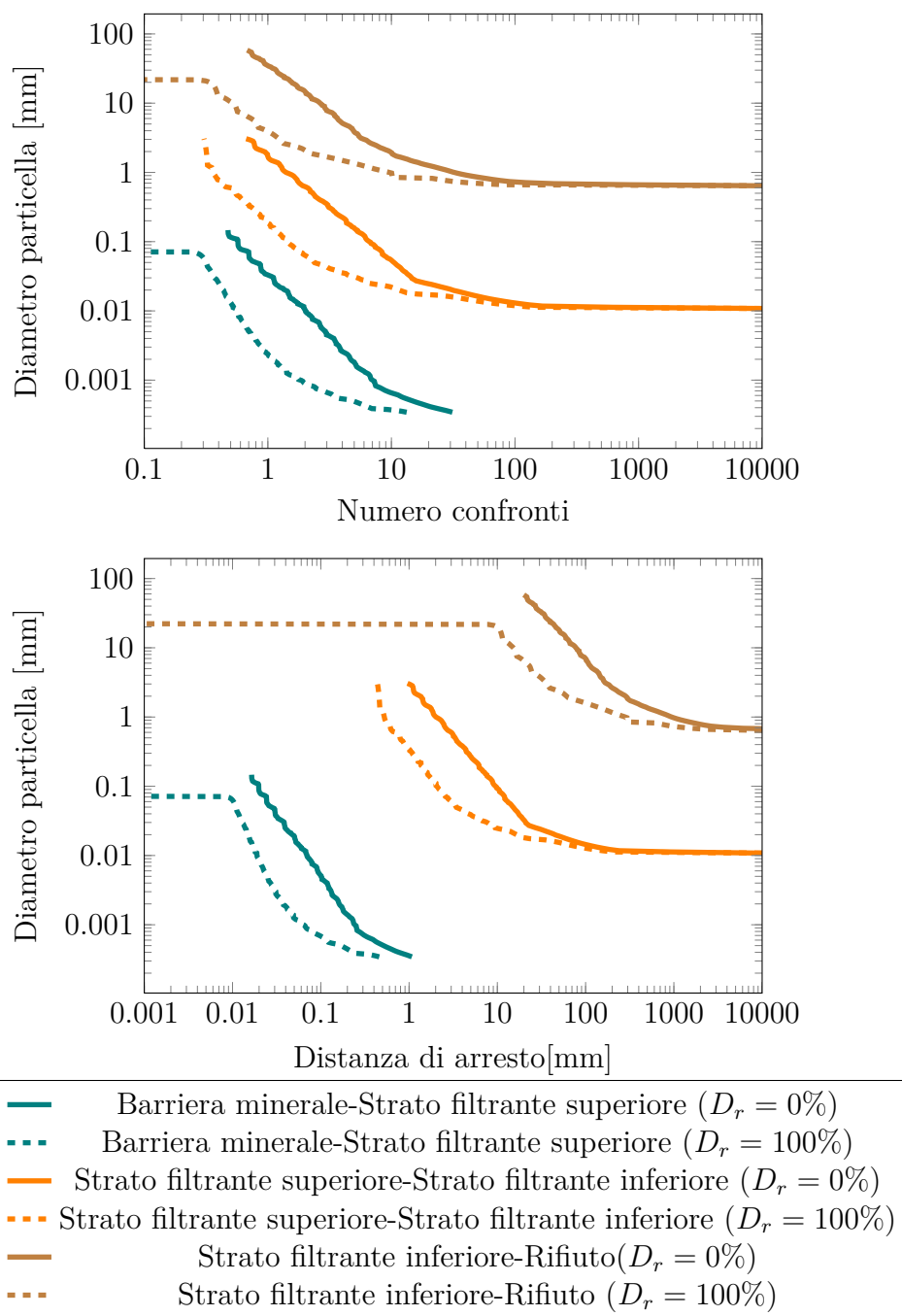


Figura 5.11: Analisi di compatibilità granulometrica secondo il metodo di *Musso e Federico* per un filtro a strato doppio all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto nel pacchetto di copertura.

te inferiore è possibile determinare il diametro che corrisponde a un passante del 10%, necessario per determinare la conducibilità idraulica che si raggiunge all'interno di tale strato. Dal diametro $d_{10} = 0,80699$ mm si calcola, utilizzando la relazione di *Kozeny-Carman*, una conducibilità idraulica $k = 2,15 \cdot 10^{-2}$ m/s nella configurazione a minima densità e $k = 1,68 \cdot 10^{-3}$ m/s nella configurazione a massima densità. Ipotizzando uno spessore dello strato filtrante inferiore di 30 cm si valuta una trasmissività idraulica pari a $6,45 \cdot 10^{-3}$ m²/s nella configurazione a minima densità e di $5,04 \cdot 10^{-4}$ m²/s nella configurazione a massima densità. Tali valori sono notevolmente superiori a quelli trovati nel caso di filtro a singolo strato e risultano essere più che sufficienti a provvedere al drenaggio del biogas, nelle ipotesi di passo tra i pozzi di aspirazione pari a 25 m e altezza dello strato di rifiuto di 15 m.

Dai risultati delle analisi di compatibilità granulometrica tra strato filtrante superiore e strato filtrante inferiore si nota che le particelle di materiale base di diametro superiore a 0,013 mm vengono arrestate, con un livello di confidenza del 95%, entro una profondità di 10 cm all'interno dello strato inferiore. Aggiungendo quindi un franco di 10 centimetri allo spessore dello strato filtrante inferiore le particelle di materiale base che possono interferire con la porzione destinata al drenaggio del biogas sono quelle di diametro compreso tra 0,011 mm e 0,013 mm: le particelle di diametro superiore sono arrestate all'interno del franco, mentre quelle di diametro inferiore, non trovando nello strato costrizioni in grado di arrestarle, migrano verso gli strati successivi. Delle particelle comprese tra questi due diametri, che rappresentano una percentuale in peso inferiore al 1% del materiale che costituisce lo strato filtrante superiore, quelle che raggiungono effettivamente lo strato filtrante inferiore sono inoltre soltanto quelle che si trovano in prossimità dell'interfaccia poiché quelle che si trovano invece nella parte più alta sono arrestate dalle costrizioni che si formano, all'interno dello stesso filtro superiore, tra le particelle più grossolane. Il quantitativo di particelle di materiale base che può arrestarsi nel filtro inferiore a una profondità superiore al fran-

co appare quindi trascurabile e ininfluyente nei confronti della conducibilità idraulica di quest'ultimo strato.

In accordo con la normativa, che prescrive per il drenaggio del biogas uno spessore di almeno 0,5 m, il filtro può dunque essere realizzato assegnando allo strato superiore uno spessore di 0,20 m e allo strato inferiore uno spessore di 0,30 m cui va aggiunto lo spessore dello strato di regolarizzazione realizzato con la stessa granulometria dello strato filtrante inferiore.

5.2.4 Triplo strato di materiale granulare tra barriera minerale e rifiuto

Le soluzioni finora viste prevedevano che lo strato di regolarizzazione fosse costituito da un materiale della medesima granulometria dello strato destinato al drenaggio del biogas. Per ridurre la profondità di infiltrazione delle particelle che costituiscono lo strato a contatto con il rifiuto, lo strato di regolarizzazione può invece essere realizzato con una granulometria *ad hoc*. Tale tipo di soluzione può essere descritta da un modello in cui il filtro posto all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto consiste di tre strati caratterizzati da una differente granulometria.

Le curve di distribuzione granulometrica con cui si è schematizzata tale soluzione sono riportate in figura 5.12. Le curve che caratterizzano i due strati superiori sono le medesime della soluzione con filtro a doppio strato, le considerazioni che riguardano il rapporto tra tali strati tra di loro e con la barriera minerale saranno dunque le stesse del precedente paragrafo. Di seguito l'attenzione sarà posta invece sull'interazione tra strato filtrante inferiore, strato di regolarizzazione e rifiuto.

I risultati delle analisi di stabilità interna sui materiali che costituiscono gli strati che compongono il filtro sono rappresentati nei grafici delle figure 5.13 e 5.14. Come già nei casi precedenti si osserva che la stabilità interna non è verificata con il criterio di *Kezdi*, mentre lo è con il criterio di *Kenney* e *Lau*. Essendo la validità di quest'ultimo maggiormente comprovata per le frazioni

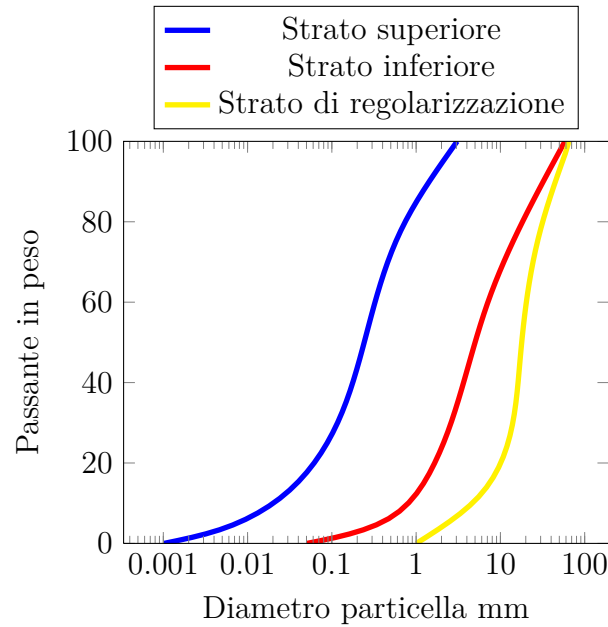


Figura 5.12: Curve granulometriche per il filtro a tre strati posto all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto nel pacchetto di copertura.

fini si ritiene di poter considerare le granulometrie adottate internamente stabili.

I diametri corrispondenti a un passante del 15% e dell'85% e i rapporti D_{15}/d_{85} calcolati per verificare la compatibilità granulometrica secondo il criterio di *Terzaghi* sono riportati in tabella 5.4. I grafici ottenuti svolgendo le analisi di compatibilità granulometrica secondo il metodo di *Musso e Federico* (corretto con le osservazioni di *Humes e Locke et al.*) sono riportati in figura 5.15.

Le particelle appartenenti al materiale che costituisce lo strato filtrante inferiore di dimensione minore di 0,19 mm non trovano all'interno dello strato di regolarizzazione costrizioni in grado di fermarle, tuttavia, come si è già avuto modo di spiegare nelle soluzioni precedentemente discusse, solo la parte più vicina all'interfaccia di queste particelle viene erosa, mentre le rimanenti trovano, all'interno dello stesso filtro inferiore, delle costrizioni che

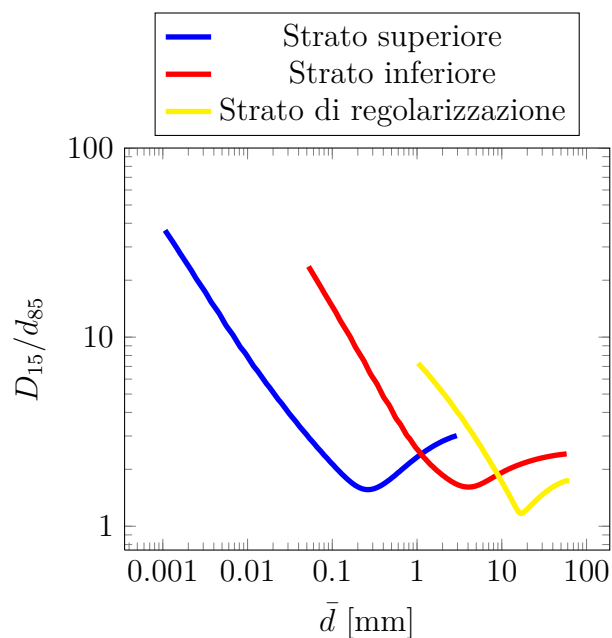


Figura 5.13: Analisi della stabilità interna secondo il criterio di *Kezdi* per il filtro a tre strati posto all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto nel pacchetto di copertura.

	D_{15}	d_{85}	D_{15}/d_{85}
Barriera minerale-Strato superiore	0,03865	0,06938	0,55713
Strato superiore-Strato inferiore	1,23009	1,01239	1,21504
Strato inferiore-Strato regolarizzazione	7,42749	24,19787	0,30695
Strato regolarizzazione-Rifiuto	15,03193	37,51692	0,40067

Tabella 5.4: Analisi di compatibilità granulometrica con il metodo di *Terzaghi* per il filtro a tre strati

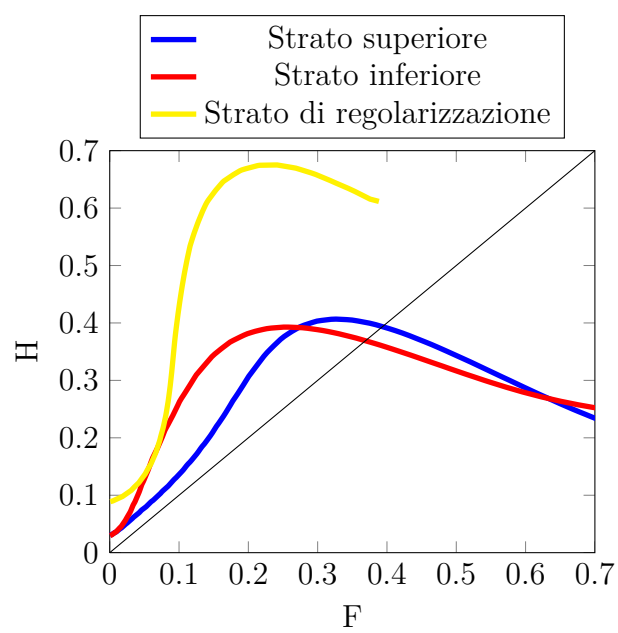


Figura 5.14: Analisi della stabilità interna secondo il criterio di *Kenney* e *Lau* per il filtro a tre strati posto all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto nel pacchetto di copertura.

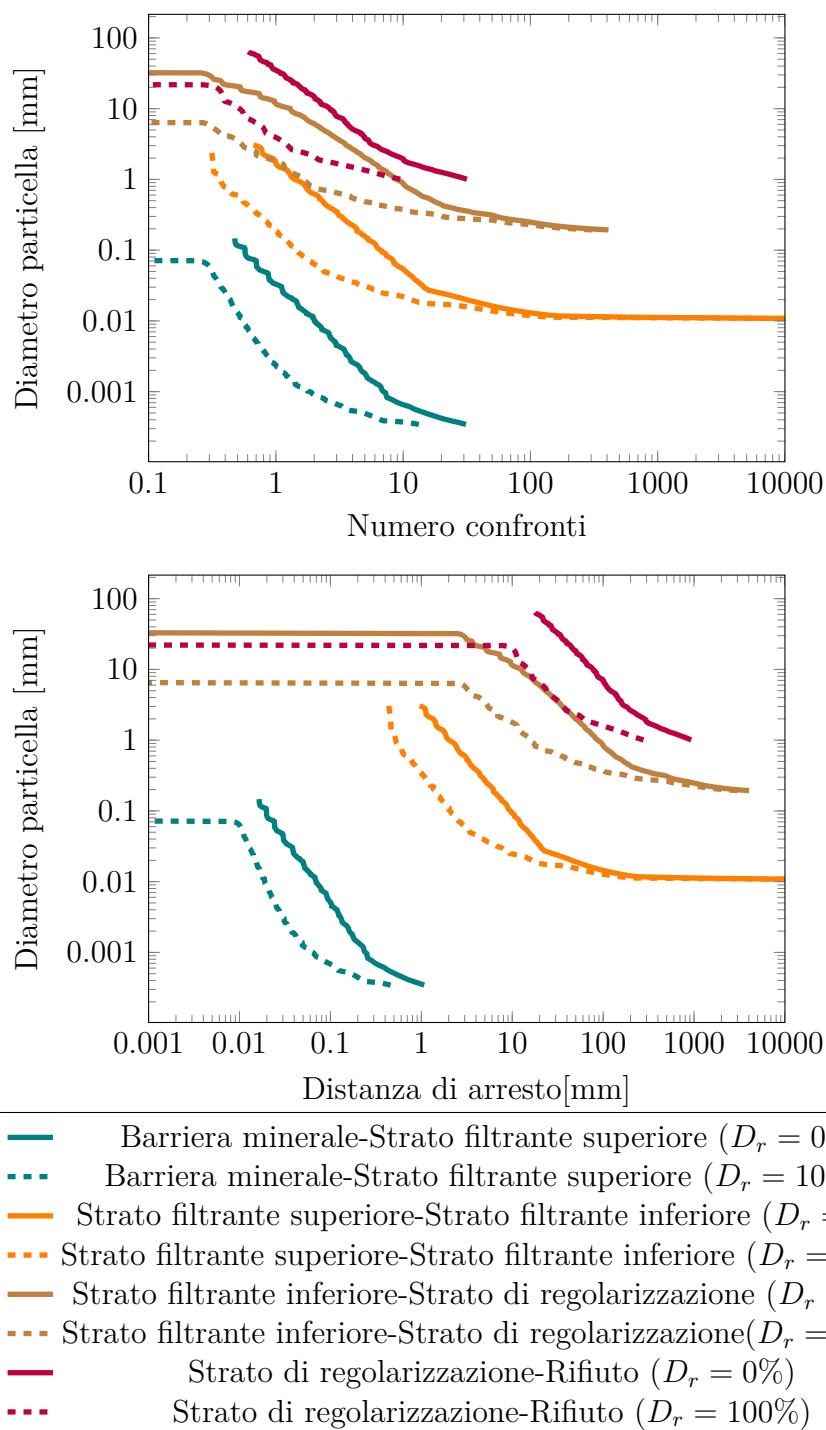


Figura 5.15: Analisi di compatibilità granulometrica secondo il metodo di *Musso e Federico* per un filtro a tre strati posto all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto nel pacchetto di copertura.

le arrestano. Si può osservare che già particelle del materiale di base di diametro inferiore a 0,85 mm compiono un percorso all'interno dello strato di regolarizzazione che, nella configurazione con densità relativa pari allo 0% e con un livello di confidenza del 95%, è inferiore a 10 cm.

Per quanto riguarda l'interazione tra strato di regolarizzazione e rifiuto si osserva che anche le particelle più piccole del primo trovano, all'interno del secondo, costrizioni in grado di arrestarle. Si può osservare che, nella configurazione con densità relativa pari allo 0%, le particelle che, con un livello di confidenza del 95%, compiono un percorso all'interno del rifiuto inferiore ai 10 cm sono quelle di diametro superiore a 7 mm. Queste particelle rappresentano più dell'85% del materiale che costituisce lo strato di regolarizzazione. Nella soluzione vista invece al precedente paragrafo, dove lo strato di regolarizzazione era realizzato con la stessa granulometria dello strato inferiore del filtro, le particelle che nelle medesime condizioni erano arrestate entro una profondità di 10 cm rappresentavano appena poco più del 40% del materiale a contatto con il rifiuto.

Le verifiche che riguardano la trasmissività dello strato di regolarizzazione non sono necessarie in quanto la funzione di drenaggio del biogas è esercitata dallo strato sovrastante. Affinché lo strato di regolarizzazione non agisca da schermo nei confronti della migrazione del biogas verso lo strato superiore è sufficiente verificare che questo sia caratterizzato da una conducibilità idraulica non inferiore a quella dello strato sovrastante. Tale verifica è immediata per lo strato di regolarizzazione nelle condizioni originali, prima cioè che avvenga la migrazione in esso di particelle del materiale di base, poiché la curva di distribuzione granulometrica che lo caratterizza si mantiene in ogni suo punto a destra della curva di distribuzione granulometrica dello strato destinato al drenaggio del biogas. Con l'evolversi dei fenomeni di trasporto delle particelle provenienti dallo strato sovrastante si può assistere a una trasformazione della curva di distribuzione granulometrica che caratterizza lo strato di regolarizzazione con un incremento delle frazioni fini e quindi

una diminuzione della conducibilità idraulica. Applicando il secondo criterio proposto da *Terzaghi* si valuta un rapporto $D_{15}/d_{15} = 6,038158$, superiore al valore minimo di 4 necessario per ritenere la conducibilità idraulica del filtro superiore a quella del materiale di base.

5.2.5 Geotessile all'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto

La soluzione qui discussa prevede l'interposizione tra barriera minerale e rifiuto di un filtro in geotessile. L'assenza di uno strato da destinare al drenaggio del biogas rende tale alternativa utilizzabile solo nelle discariche per rifiuti inerti.

Il possibile insorgere degli stati limite legati all'accecamiento e all'intasamento non desta preoccupazione. Nell'impiego in copertura non è infatti richiesto che venga tutelata la permeabilità dell'interfaccia con la barriera minerale, anzi, il raggiungimento degli stati limite citati favorisce un maggiore isolamento del rifiuto rispetto all'ambiente esterno, che è uno dei compiti affidati alla barriera minerale, e una maggiore capacità di ritenzione delle particelle fini del materiale di base.

I principali problemi connessi all'impiego del filtro in geotessile sono dovuti ai dubbi sulla sua durabilità. L'impiego di un geotessuto non tessuto a diretto contatto con il rifiuto è da evitare per il possibile laceramento in caso di contatto con corpi taglienti. L'incompatibilità granulometrica tra il rifiuto e la barriera minerale in assenza del filtro fa sì che qualora vi fosse una rottura del geotessile si avvierebbe un fenomeno erosivo che rapidamente porterebbe al collasso del pacchetto di copertura e il possibile affioramento del rifiuto. È da preferire per tale soluzione l'uso di un geotessuto tessuto che, sebbene più costoso, offre maggiori garanzie di resistenza contro il laceramento.

5.2.6 Geotessile e singolo strato di materiale granulare tra barriera minerale e rifiuto

Una soluzione che ben si presta all'impiego in discariche per rifiuti pericolosi/non pericolosi biogassificabili prevede di disporre al di sotto di un filtro in geotessile e a contatto con il rifiuto un materiale granulare. Affinché si abbia un efficace drenaggio del biogas andrà verificata la trasmissività che offre il materiale granulare impiegato che, in accordo con la normativa, non dovrà avere spessore inferiore a 0,5 m.

Le analisi qui svolte si riferiscono a un materiale granulare con la medesima curva di distribuzione granulometrica del materiale impiegato come strato di regolarizzazione nel paragrafo 5.2.4. Dalle analisi di stabilità interna e di compatibilità granulometrica con il rifiuto si ottengono dunque gli stessi risultati visti allora. Per quanto concerne invece la ritenzione delle particelle che costituiscono la barriera minerale, tale funzione è qui svolta dal filtro in geotessile, per il quale rimangono valide da una parte le considerazioni relative all'acceccamento e all'intasamento di cui si accennava nel precedente paragrafo e dall'altra le riserve per quanto riguarda la sua durabilità. Il filtro in geotessile può essere realizzato con geotessuto non tessuto, non essendo posto a contatto diretto con il rifiuto.

Per quanto riguarda i requisiti di trasmissività necessari a svolgere la funzione di drenaggio del biogas il diametro corrispondente a un passante in peso del 10% del materiale che costituisce lo strato granulare del filtro è valutato in $d_{10} = 4,64635$ mm. Utilizzando la teoria di *Kozeny-Karman* si calcola una conducibilità idraulica di $k = 0,05584$ m/s nella configurazione a minima densità e di $k = 0,71152$ m/s nella configurazione a massima densità. Ipotizzando per lo strato di materiale granulare destinato al drenaggio del biogas uno spessore di 0,5 m si valuta una trasmissività idraulica di $3,55 \cdot 10^{-1}$ m²/s nella configurazione a minima densità e di $2,79 \cdot 10^{-2}$ m²/s nella configurazione a massima densità. Tali valori risultano essere maggiori di alcuni ordini di grandezza rispetto ai valori di minima trasmissività richiesta nell'ipotesi

di interasse tra i pozzi di aspirazione di 25 m, di altezza dello strato di rifiuti pari a 15 m e pressione massima ammissibile del biogas di 2 KPa. In accordo con tali risultati lo strato di materiale granulare è quindi idoneo a provvedere al drenaggio del biogas.

Capitolo 6

Progettazione dello strato filtrante di fondo

All'interno di una discarica per rifiuti pericolosi/non pericolosi l'umidità contenuta nel rifiuto conferito e la presenza di infiltrazioni di acqua meteorica danno luogo allo sviluppo di reazioni di tipo chimico e biologico da cui si originano biogas e percolato. Quest'ultimo, permeando nel corpo rifiuti, giunge al fondo della discarica dove è necessario provvedere al suo convogliamento verso gli impianti di estrazione. All'uopo deve essere disposto, al di sopra della barriera di confinamento, uno strato drenante che garantisca una sufficiente conducibilità idraulica e al contempo sia protetto da fenomeni di intasamento per effetto della migrazione e deposizione delle particelle che costituiscono il rifiuto. Tali accorgimenti non sono richiesti nelle discariche per rifiuti inerti dove, non essendovi una significativa produzione di percolato, è possibile disporre il rifiuto a contatto con la barriera di confinamento senza interposizione di strati drenanti.

Nel corso del capitolo l'attenzione sarà rivolta alla progettazione del pacchetto di fondo nelle discariche per rifiuti pericolosi/non pericolosi. In un primo momento si valuteranno le proprietà idrauliche che deve possedere lo strato destinato al drenaggio del percolato e successivamente, applicando le

teorie presentate nei capitoli 2 e 3, si analizzeranno le dinamiche che avvengono tra gli strati che costituiscono il pacchetto di fondo e saranno proposte alcune soluzioni progettuali per la realizzazione di questo.

6.1 Proprietà idrauliche richieste

Per la determinazione delle caratteristiche idrauliche richieste allo strato drenante di fondo è necessario effettuare una stima della portata di percolato da smaltire. Un semplice modello che consente una stima approssimata della produzione di percolato consiste nel considerare l'afflusso come una aliquota delle piogge. Per tale aliquota la letteratura fornisce valori che possono raggiungere il 50% in fase di esercizio e con rifiuto poco compattato (Canziani e Cossu, 1989). Per garantire un corretto drenaggio del percolato anche in caso di precipitazioni consistenti durante le prime fasi della coltivazione della discarica, si ritiene opportuno, nel dimensionamento dello strato drenante, assumere per tale aliquota i valori superiori reperibili in letteratura. La portata specifica di percolato q_h può dunque essere espressa come:

$$q_h = 0,5 \cdot h \quad (6.1)$$

Le altezze di pioggia h associate a un tempo di ritorno T_R possono essere calcolate applicando metodi statistici, quale il metodo di *Gumbel*, a partire dalle misure dedotte dagli annali idrologici. Per la zona di Padova, osservando i dati della relativa stazione pluviografica, è possibile calcolare le altezze di pioggia riportate nella tabella 6.1.

Ipotizzando l'apporto di percolato costante per unità di lunghezza e distribuito uniformemente lungo tutta la lunghezza dello strato drenante, il moto è di tipo stazionario e gradualmente vario. Nel dimensionamento di tale strato andrà verificato che il suo spessore S sia superiore a quello dello spessore liquido massimo s_{max} (figura 6.1).

	Durata			
	$\tau = 15 \text{ min}$	$\tau = 30 \text{ min}$	$\tau = 1 \text{ ora}$	$\tau = 3 \text{ ore}$
$T_R = 5 \text{ anni}$	25,03 mm	32,01 mm	40,17 mm	54,67
$T_R = 10 \text{ anni}$	30,07 mm	37,47 mm	48,19 mm	65,95
$T_R = 20 \text{ anni}$	34,91 mm	42,72 mm	55,89 mm	76,78
$T_R = 50 \text{ anni}$	41,18 mm	49,51 mm	65,84 mm	90,79
$T_R = 100 \text{ anni}$	45,88 mm	54,60 mm	73,31 mm	101,29

Tabella 6.1: Valori estremi delle altezze di pioggia per alcuni tempi di ritorno e durate di pioggia per la zona di Padova

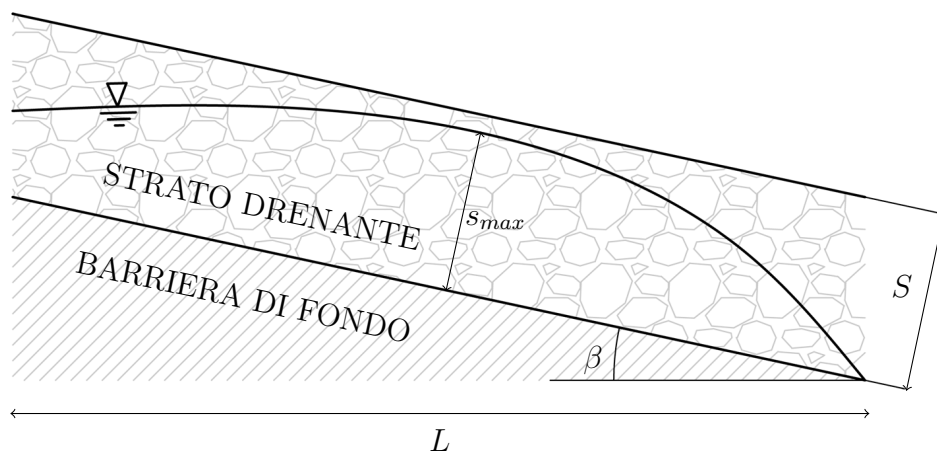


Figura 6.1: Profilo della superficie liquida all'interno dello strato drenante.

Il parametro caratteristico dello strato drenante di maggiore importanza è la conducibilità idraulica k , che può essere valutata con la relazione di *Kozeny-Carman* già presentata al paragrafo 5.1. Alcuni autori suggeriscono di assumere una conducibilità idraulica di lungo termine k_{LT} (Giroud *et al.*), ottenuta applicando dei fattori di riduzione alla conducibilità idraulica k , per considerare la diminuzione di capacità di flusso per effetto dei fenomeni di intasamento e degradazione chimica causati dalla permeazione del percolato all'interno dello strato drenante. Nelle applicazioni presentate in questo capitolo tali fenomeni saranno invece scontati attraverso uno studio parametrico delle variazioni delle prestazioni dello strato drenante al variare dei valori di viscosità cinematica del percolato.

All'interno dello strato per il drenaggio del percolato, il profilo della superficie liquida può disporsi diversamente a seconda del valore assunto dal parametro adimensionale λ (Giroud *et al.*, 2000), definito come:

$$\lambda = \frac{q_h}{k \cdot \tan^2 \beta} \quad (6.2)$$

dove β è l'angolo che lo strato drenante forma con l'orizzontale. Lo spessore liquido massimo può quindi essere determinato utilizzando la relazione proposta da *Giroud*:

$$s_{max} = j \cdot \frac{\sqrt{\tan^2 \beta + 4q_h/k} - \tan \beta}{2 \cos \beta} \cdot L = j \cdot \frac{\sqrt{1 + 4\lambda} - 1}{2(\cos \beta / \tan \beta)} \cdot L \quad (6.3)$$

dove L è la lunghezza della proiezione orizzontale dello strato drenante mentre j è dato da:

$$\begin{aligned} j &= 1 - 0,12 \exp \left\{ - \left[\log \left(\frac{8(q_h/k)}{5 \tan^2 \beta} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^2 \right\} \\ &= 1 - 0,12 \exp \left\{ - \left[\log \left(\frac{8\lambda}{5} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Un corretto dimensionamento dello strato per il drenaggio del percolato dovrà garantire che lo spessore di questo si mantenga superiore allo spessore liquido massimo appena determinato.

6.2 Confronto tra le possibili soluzioni progettuali

Nel seguito si analizzeranno alcune possibili soluzioni progettuali per la realizzazione dell'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento. La descrizione granulometrica del rifiuto è fatta utilizzando la curva superiore che delimita il fuso individuato da *Jessberger* (figura 4.4). Tale curva è caratterizzata da una prevalenza di particelle fini e risulta quindi essere la distribuzione granulometrica più critica per descrivere il rifiuto come materiale di base in problemi di filtrazione.

L'elemento filtrante posto all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento deve garantire la funzione di drenaggio del percolato. La granulometria di questo dovrà essere tale da offrire una sufficiente conducibilità idraulica e al contempo prevenire fenomeni di occlusione dovuti alla migrazione di particelle grossolane del rifiuto all'interno dello strato drenante. A differenza di quanto visto in copertura, l'esigenza non è quindi tanto rivolta alla conservazione della granulometria del materiale di base (il rifiuto), quanto piuttosto quella di evitare fenomeni di intasamento dello strato filtrante.

Le soluzioni analizzate per la realizzazione dell'elemento sono schematizzate in figura 6.2 e sono quelle di:

- Filtro costituito da un singolo strato di materiale granulare posto all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento (figura 6.2a);
- Filtro costituito da un doppio strato di materiale granulare di differente granulometria posto all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento (figura 6.2b).

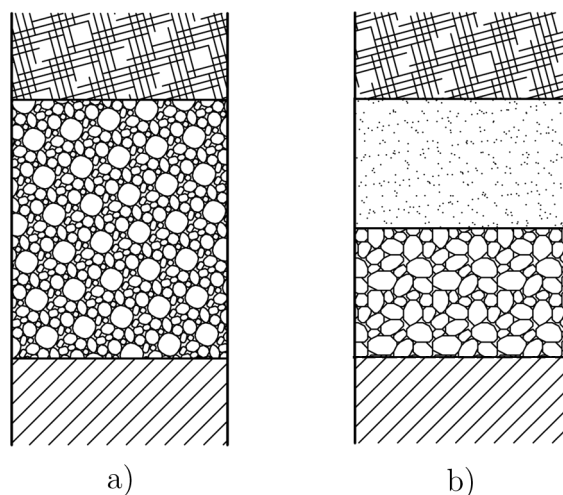


Figura 6.2: Soluzioni progettuali analizzate per il pacchetto di fondo

6.2.1 Singolo strato di materiale granulare tra rifiuto e barriera di confinamento

Una prima soluzione consiste nel disporre all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento un materiale granulare costituito da un singolo strato. A tale materiale è richiesto da una parte di avere delle proprietà idrauliche idonee al drenaggio del percolato e dall'altra, al contempo, di impedire la migrazione delle particelle di rifiuto al suo interno, potendo tale fenomeno comportare l'intasamento dello stesso strato drenante e la possibile occlusione dei dispositivi di estrazione del percolato. Questi due requisiti si traducono però in caratteristiche opposte da assegnare alla curva di distribuzione granulometrica e risultano quindi difficilmente conciliabili tra loro. La progettazione della granulometria del materiale granulare posto all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento sarà quindi necessariamente frutto di un compromesso tra le due esigenze.

Le analisi di seguito presentate si riferiranno alle tre possibili ipotesi di curva di distribuzione granulometrica da assegnare allo strato filtrante riportate in figura 6.3. Quanto più la granulometria è concentrata sulle frazioni

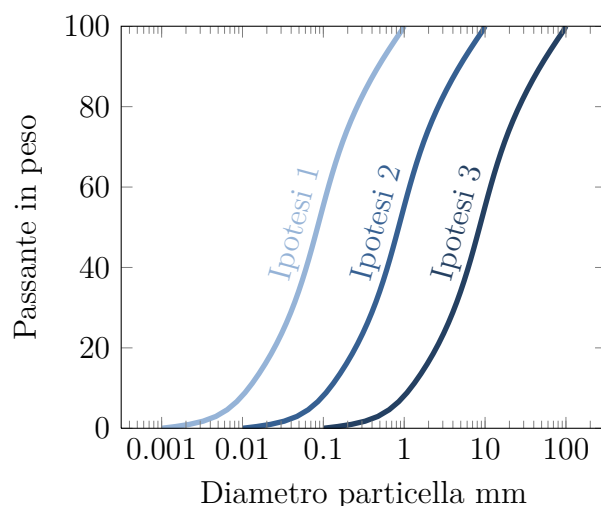


Figura 6.3: Curva granulometrica per il filtro a strato singolo posto all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento.

fini tanto meno è accentuato il fenomeno di intromissione delle particelle di rifiuto all'interno dello strato drenante, ma anche tanto più basso è il valore della conducibilità idraulica che si ottiene per la diminuzione di d_{10} . Viceversa nel caso di granulometria più grossolana si potrà disporre di un d_{10} più elevato, tuttavia la conducibilità idraulica può ridursi per l'incorrere di fenomeni di intasamento. Tale riduzione può essere valutata in un incremento della viscosità cinematica del fluido che permea il drenaggio per effetto dell'incremento delle particelle di rifiuto portate in sospensione o disciolte nel percolato. Per la determinazione dello spessore che è necessario assegnare allo strato drenante si ricorrerà dunque a un'indagine parametrica che mostri come vari lo spessore dello strato liquido al variare del valore della viscosità cinematica ν .

Le verifiche di stabilità interna compiute sulle diverse ipotesi considerate per la realizzazione dello strato filtrante sono riportate nelle figure 6.4 e 6.5, rispettivamente, secondo i criteri di *Kezdi* e *Kenney* e *Lau*. Tali verifiche sono necessarie per garantire l'autoprotezione dello strato filtrante e quindi la conservazione della sua curva di distribuzione granulometrica. Come è

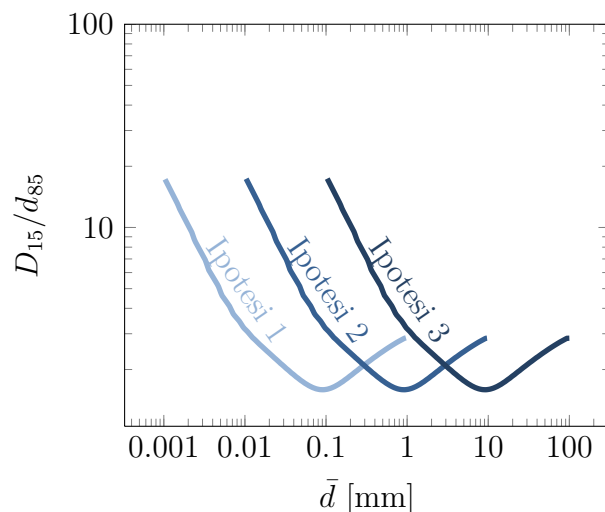


Figura 6.4: Analisi della stabilità interna secondo il criterio di *Kezdi* per il filtro a strato singolo posto all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento.

possibile osservare, e come già manifestatosi anche nelle corrispondenti analisi nel pacchetto di copertura, il criterio di *Kezdi* non risulta verificato per le frazioni fini, mentre lo è il criterio di *Kenney* e *Lau*.

La forte disomogeneità del rifiuto rende inutile l'esecuzione di verifiche di stabilità interna su tale materiale, non è quindi possibile fare affidamento sulla formazione di costrizioni all'interno di questo per trattenere le particelle più fini del rifiuto stesso.

Utilizzando il criterio di *Terzaghi* per verificare la compatibilità granulometrica del rifiuto con le tre diverse granulometrie studiate per lo strato filtrante si calcolano i rapporti $D_{15}/d_{85} = 0,000278$ nell'ipotesi 1, $D_{15}/d_{85} = 0,002805$ nell'ipotesi 2 e infine $D_{15}/d_{85} = 0,28099$ nell'ipotesi 3.

I risultati delle analisi di compatibilità granulometrica tra il rifiuto e lo strato filtrante destinato al drenaggio del percolato con il metodo di *Musso* e *Federico* (corretto con le osservazioni di *Humes* e *Locke et al.*) sono riportati in figura 6.6. Le particelle che non trovano costrizioni all'interno dello strato filtrante in grado di arrestarle sono quelle di dimensione inferiore a 0,0022

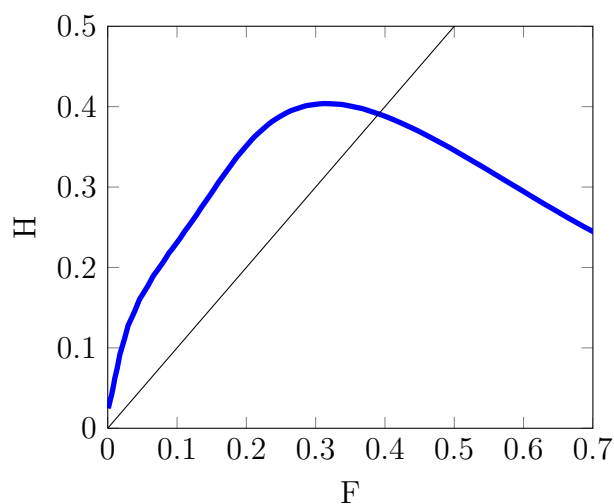


Figura 6.5: Analisi della stabilità interna secondo il criterio di *Kenney e Lau* per il filtro a strato singolo posto all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento.

mm e a 0,022 mm nelle ipotesi, rispettivamente, di curva granulometrica 2 e 3. La curva granulometrica dell'ipotesi 1 è invece costituita da particelle sufficientemente fini da formare costrizioni in grado di arrestare anche le particelle più piccole del rifiuto.

Con la curva di distribuzione granulometrica dell'ipotesi 1 le particelle che costituiscono il rifiuto sono arrestate entro profondità inferiori al millimetro. Qualora sia invece adottata la granulometria dell'ipotesi 2 si nota che, con il medesimo livello di confidenza, fra le particelle che vengono arrestate nel filtro, quelle di dimensioni inferiori compiono un percorso inferiore ai 15 centimetri nella configurazione con densità relativa dello 0%. Osservando invece i risultati delle analisi di compatibilità granulometrica nell'ipotesi 3 si evince che le particelle che trovano nel filtro costrizioni in grado di arrestarle possono compiere percorsi che, nella configurazione con densità relativa dello 0% e un livello di confidenza del 95%, possono eccedere i 150 centimetri. Dal momento che il rifiuto non è verificato contro l'instabilità interna, non è garantita l'inibizione dei fenomeni di erosione delle particelle che lo costituiscono per effetto della formazione di costrizioni all'interno del rifiuto stesso, la migra-

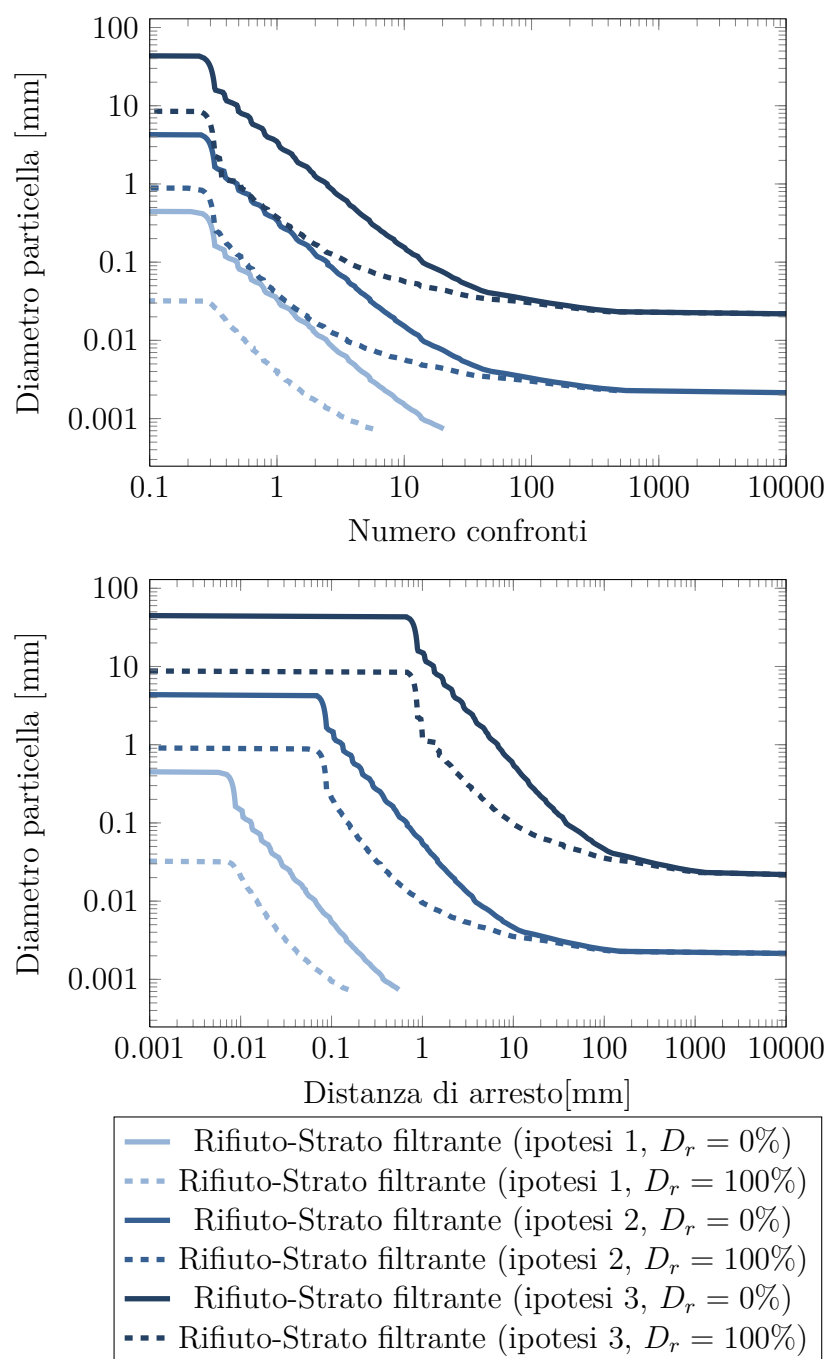


Figura 6.6: Analisi di compatibilità granulometrica secondo il metodo di *Musso* e *Federico* per un filtro a strato singolo all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento.

zione delle particelle appartenenti al rifiuto all'interno del filtro può quindi protrarsi nel tempo. Alla luce di ciò, per evitare fenomeni di intasamento, è opportuno che lo spessore dello strato filtrante sia superiore a quello di massima infiltrazione determinato con il livello di confidenza precedentemente assunto. La curva granulometrica dell'ipotesi 3 appare quindi non idonea richiedendo uno spessore dello strato filtrante necessario ad evitare fenomeni di intasamento che sottrae una quantità di volume utile al conferimento dei rifiuti non trascurabile.

Nei grafici riportati nelle figure 6.7, 6.8 e 6.9 sono tracciati gli andamenti del massimo spessore dello strato liquido s_{max} all'interno dello strato drenante in rapporto alla lunghezza L di questo al variare della viscosità cinematica ν del percolato e per differenti valori di portata specifica da drenare q_h , per le due configurazioni con densità relativa $D_r = 0\%$ e $D_r = 100\%$ e per le tre ipotesi di curva granulometrica. Con le curve granulometriche delle ipotesi 1 e 2 si vede che lo spessore dello strato liquido raggiunge valori eccessivi anche per lunghezze dello strato drenante contenute e valori di viscosità cinematica pari a quelli dell'acqua a una temperatura di 20°C. Più coerenti sono invece i risultati che si ottengono nell'ipotesi 3, dove si osserva che nella configurazione con densità relativa $D_r = 100\%$, ipotizzando una produzione di percolato di 0,33 l/min/m², una lunghezza dello strato drenante di 20 metri e una viscosità cinematica di $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ m²/s si raggiungono spessori dello strato liquido di circa 40 centimetri. Tali valori crescono all'aumentare della viscosità cinematica: si vede che già per $\nu = 3 \cdot 10^{-6}$ m²/s, mantenendo costanti gli altri parametri, lo spessore dello strato liquido è più che raddoppiato.

6.2.2 Doppio strato di materiale granulare tra rifiuto e barriera di confinamento

La difficile conciliabilità dei due criteri che guidano la progettazione dello strato drenante nel fondo di una discarica per rifiuti pericolosi/non pericolosi, ossia una elevata conducibilità idraulica e la tutela nei confronti di

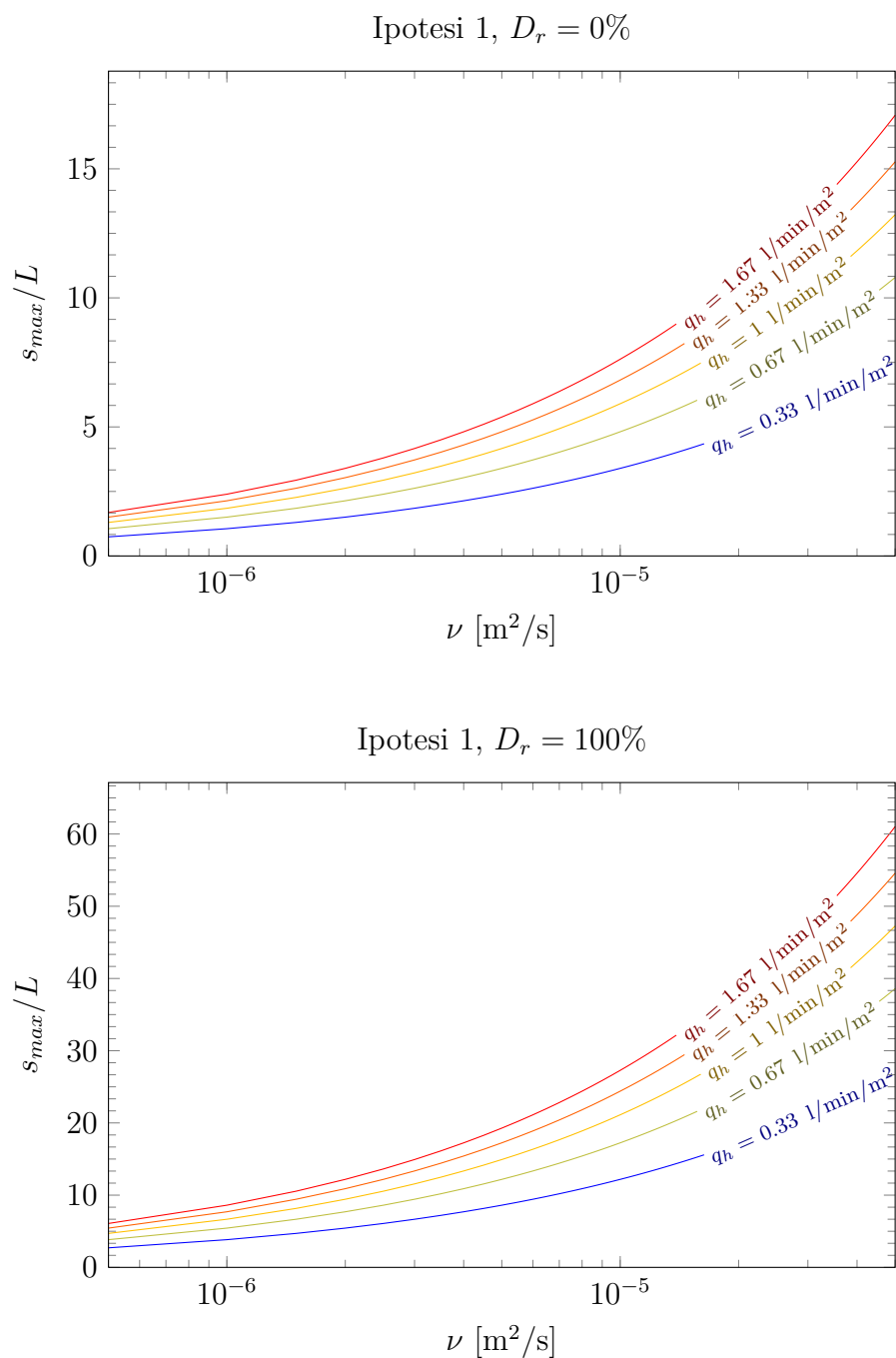


Figura 6.7: Andamento del massimo spessore dello strato liquido all'interno dello strato destinato al drenaggio del percolato con la granulometria dell'ipotesi 1 per una pendenza del fondo del 5%.

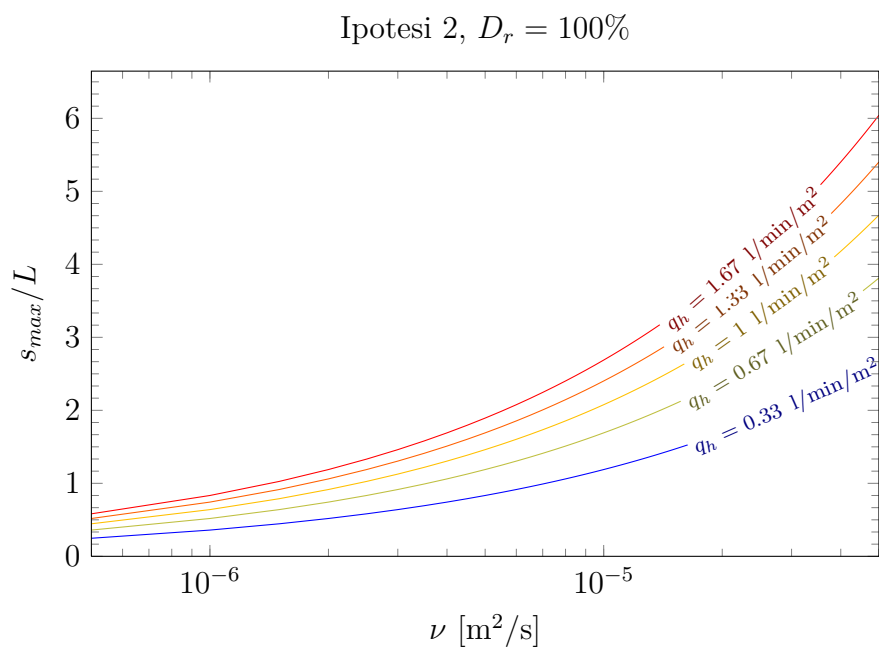
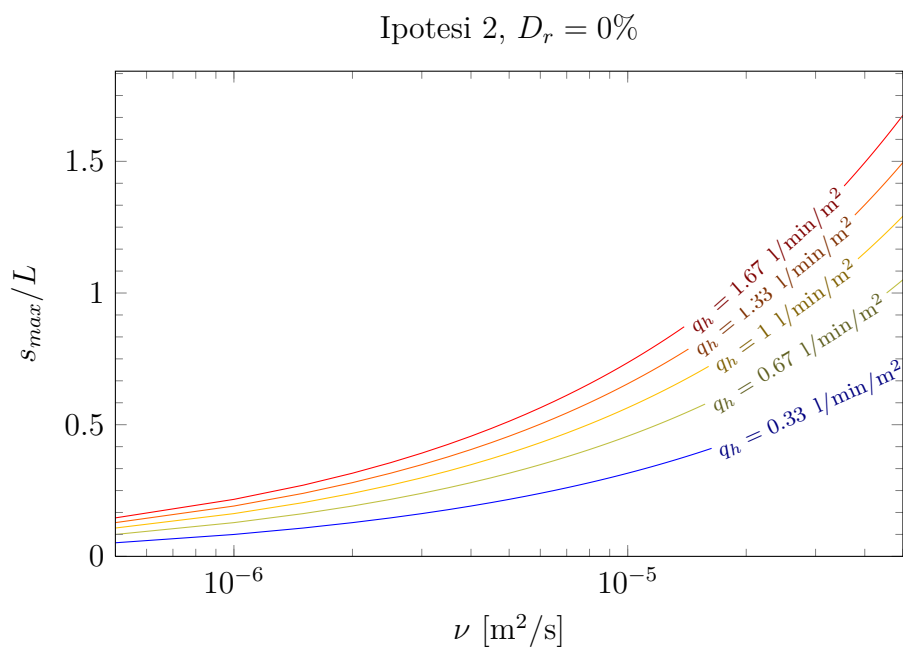


Figura 6.8: Andamento del massimo spessore dello strato liquido all'interno dello strato destinato al drenaggio del percolato con la granulometria dell'ipotesi 2 per una pendenza del fondo del 5%.

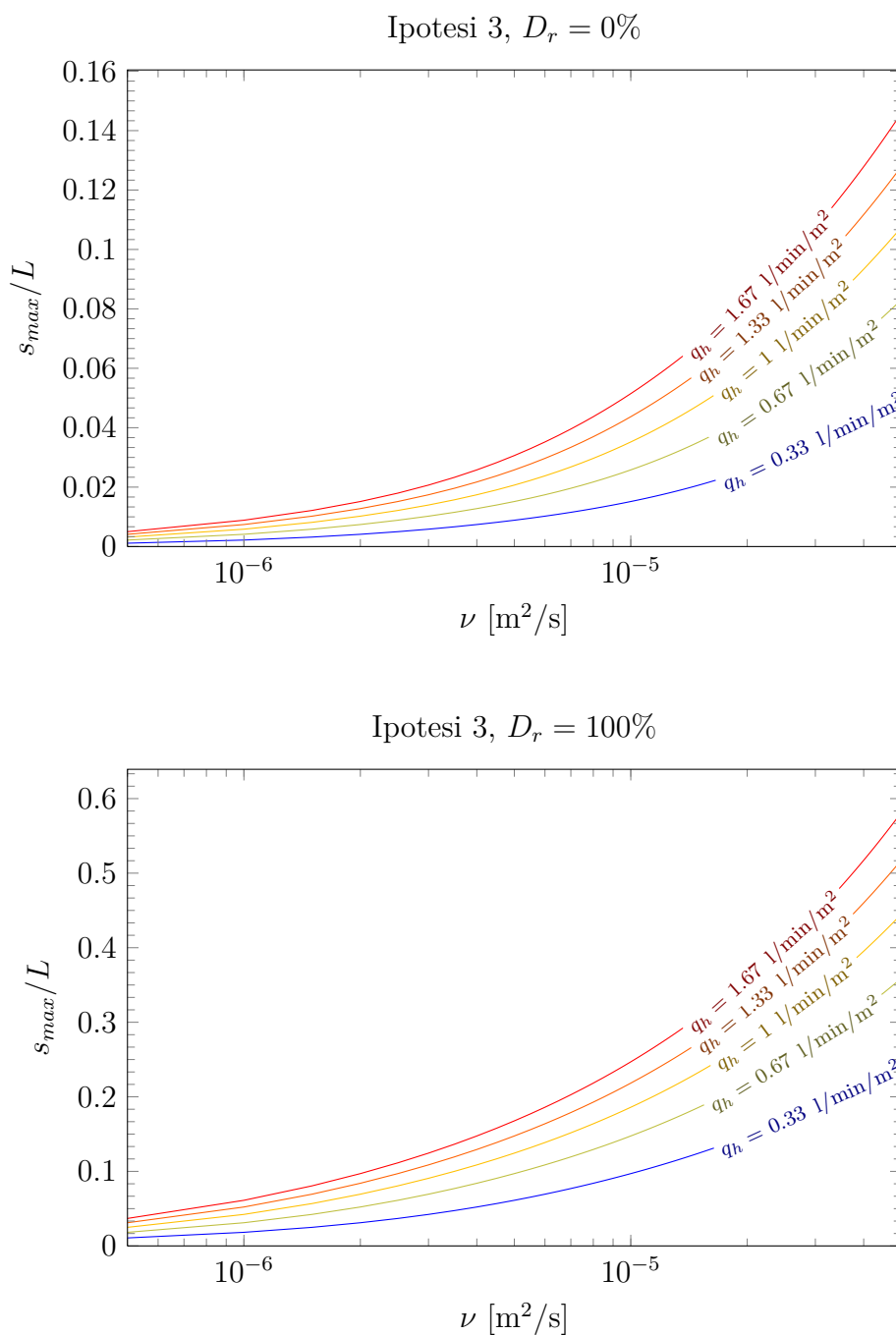


Figura 6.9: Andamento del massimo spessore dello strato liquido all'interno dello strato destinato al drenaggio del percolato con la granulometria dell'ipotesi 3 per una pendenza del fondo del 5%.

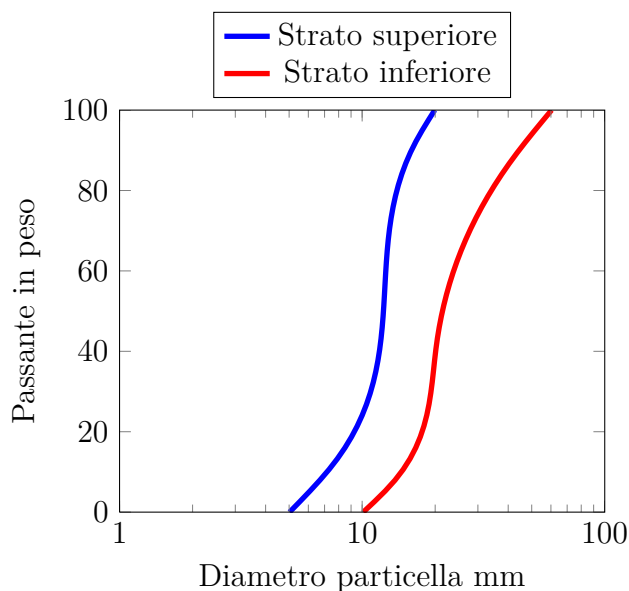


Figura 6.10: Curve granulometriche per il filtro a strato doppio posto all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento.

fenomeni di intasamento, fa propendere per una soluzione diversa rispetto a quella di filtro a strato singolo. Tale soluzione può consistere nel realizzare l'elemento all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento in due strati: uno superiore di granulometria più fine destinato alla ritenzione delle particelle di rifiuto e uno inferiore di granulometria più grossolana cui è affidato il compito di provvedere al drenaggio del percolato.

Per studiare questa soluzione si sono adottate per i due strati le curve di distribuzione granulometrica riportate in figura 6.10. I risultati delle relative analisi di stabilità interna con il criterio di *Kezdi* sono riportati nel grafico di figura 6.11. Il criterio di *Kenney* e *Lau* non è applicabile non essendo la curva di distribuzione granulometrica sufficientemente estesa.

Applicando il criterio di *Terzaghi* si valutano dei rapporti D_{15}/d_{85} pari a 0,129614 per l'interazione tra rifiuto e strato filtrante superiore e di 1,104676 per l'interazione tra strato filtrante superiore e strato filtrante inferiore.

Svolgendo le analisi di compatibilità granulometrica con il metodo di *Mus-*

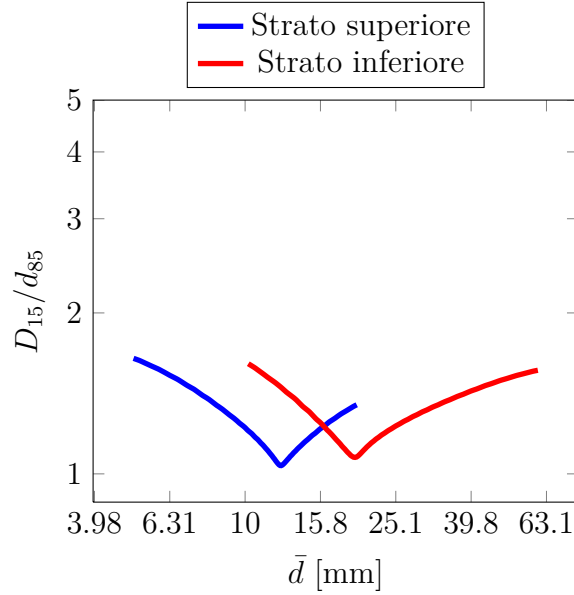


Figura 6.11: Analisi della stabilità interna secondo il criterio di *Kezdi* per il filtro a strato doppio posto all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento.

so e *Federico* (corretto con le osservazioni di *Humes* e *Locke et al.*), i cui risultati sono riportati in figura 6.12, si osserva che particelle che costituiscono il rifiuto di diametro inferiore a 0,65 mm non trovano costrizioni all'interno dello strato filtrante superiore in grado di arrestarle. Tali particelle giungono quindi allo strato filtrante inferiore dove tuttavia, essendo il loro diametro minore di quello delle costrizioni ivi presenti ($D_{c,min} = 0,1547 \cdot D_{min} = 1,55$ mm), non danno origine a fenomeni di intasamento. La presenza di particelle di rifiuto all'interno dello strato filtrante inferiore si ripercuote d'altro canto nell'incremento della viscosità del fluido che permea lo strato drenante. Le particelle di rifiuto di dimensione superiore a 1,55 mm, pari alla costrizione più piccola dello strato filtrante inferiore, sono invece arrestate a una profondità che, con un livello di confidenza del 95% e con particelle disposte secondo la configurazione di massima densità, è di circa 15 centimetri. Nel dimensionamento dello strato filtrante superiore uno spessore di 20 centimetri appare dunque sufficiente.

L'analisi di compatibilità granulometrica tra strato filtrante superiore e strato filtrante inferiore, eseguita con un livello di confidenza del 95%, mostra che le particelle che appartengono al primo sono arrestate all'interno del secondo a una distanza di poco superiore a 15 cm nella configurazione con densità relativa $D_r = 0\%$ e a una profondità molto inferiore nella configurazione con $D_r = 100\%$. Sempre con un livello di confidenza del 95% è possibile notare che le particelle che costituiscono lo strato filtrante superiore e che possono essere arrestate a una profondità superiore ai 10 cm sono quelle di diametro inferiore a 6,5 mm. Le particelle appartenenti allo strato filtrante superiore di dimensione inferiore a tale valore rappresentano circa il 7% in peso; di queste solo quelle più prossime all'interfaccia migrano effettivamente all'interno dello strato filtrante inferiore, mentre le rimanenti trovano costrizioni in grado di arrestarle già all'interno del materiale di base. Un franco di 10 centimetri appare quindi più che sufficiente a garantire contro la variazione della granulometria dello strato filtrante inferiore per effetto del trasporto in esso di particelle appartenenti allo strato sovrastante.

Nel grafico di figura 6.13 è riportato l'andamento del rapporto s_{max}/L al variare della viscosità cinematica del liquido, per diversi valori della portata specifica e nell'ipotesi di pendenza del fondo del 5%. Indicando con S lo spessore dello strato drenante si deduce che, nella configurazione con densità relativa dello 0%, un rapporto S/L inferiore a 0,001 è sufficiente per provvedere al drenaggio di portate di percolato rilevanti anche con valori di viscosità cinematica 10 volte superiori a quella dell'acqua a 20°C. Nella configurazione con densità relativa del 100% sono invece necessari, per ottenere le medesime prestazioni idrauliche, rapporti S/L maggiori. Riferirsi a quest'ultima configurazione è maggiormente cautelativo per quanto riguarda la verifica idraulica dello strato drenante.

Supponendo di attribuire ai due strati filtranti all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento uno spessore totale di 0,5 metri (pari al minimo richiesto dalla normativa) e sottraendo da questo i 20 centimetri da assegna-

re allo strato filtrante superiore e il franco di 10 centimetri necessario per scontare la riduzione di conducibilità idraulica dello strato filtrante inferiore dovuta alla migrazione di particelle che costituiscono lo strato filtrante superiore, lo spessore utile per il drenaggio del percolato si riduce a 20 centimetri. Per tale valore di spessore e con una lunghezza dello strato drenante di 20 metri la curva di distribuzione granulometrica tracciata in figura 6.10 è idonea a provvedere al drenaggio di portate di percolato di $1,67 \text{ l/min/m}^2$ con valori di viscosità cinematica superiori di 10 volte rispetto a quelli dell'acqua a 20°C . Tali portate sono superiori a quelle causate nella zona di Padova da precipitazioni meteoriche con tempo di ritorno pari a 100 anni e durate orarie. Precipitazioni di durata inferiore all'ora seppure intense non sono particolarmente critiche per quanto riguarda la produzione di percolato, in quanto generalmente non sufficienti a portare a saturazione il volume della discarica.

Le medesime analisi sono state svolte anche con pendenze dello strato drenante del 3% e del 10%, dalle quali si è osservato un incremento dell'altezza dello spessore liquido nel primo caso e una riduzione nel secondo. Anche in tali configurazioni la curva di distribuzione granulometrica e gli spessori proposti sono comunque idonei allo smaltimento del percolato.

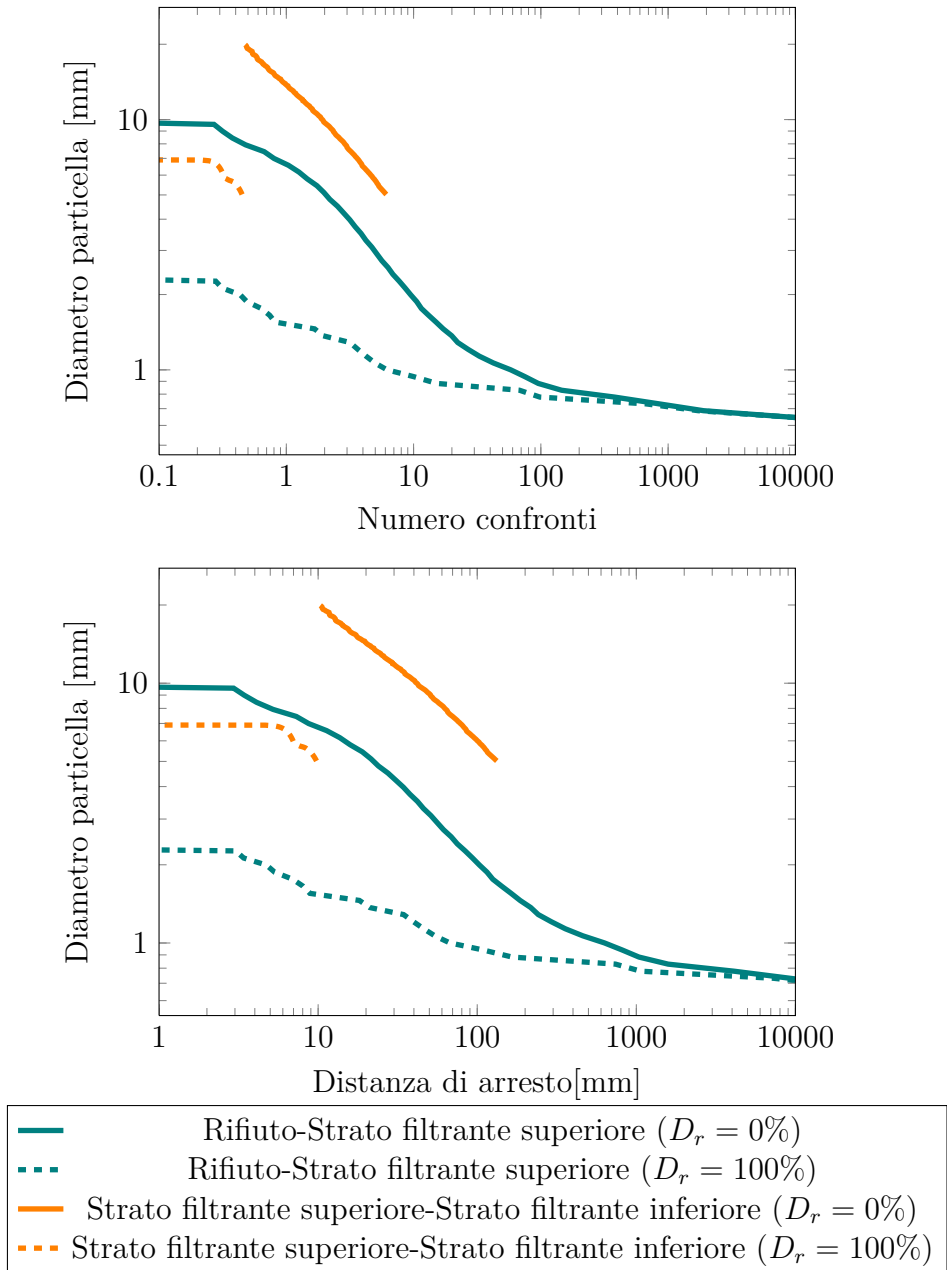


Figura 6.12: Analisi di compatibilità granulometrica secondo il metodo di *Musso* e *Federico* per un filtro a strato doppio all'interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento.

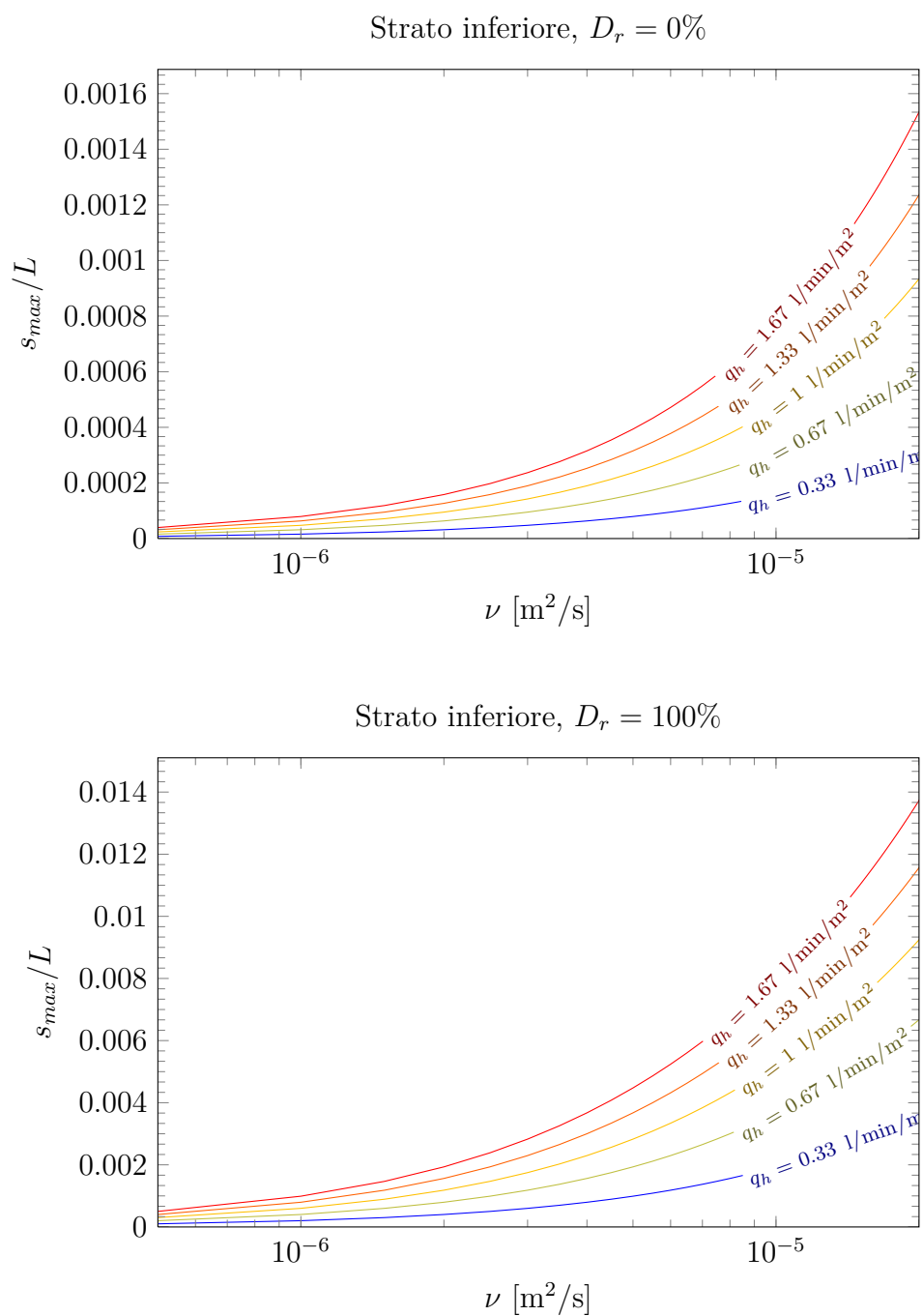


Figura 6.13: Andamento del massimo spessore dello strato liquido all'interno dello strato filtrante inferiore destinato al drenaggio del percolato per una pendenza del fondo del 5%.

Capitolo 7

Riflessioni e conclusioni

La corretta progettazione di una discarica per rifiuti solidi urbani non può prescindere da un'attenta valutazione delle dinamiche che si realizzano tra il rifiuto e gli strati che costituiscono il fondo e la copertura.

Come si è osservato nel capitolo 4 la composizione del rifiuto è, per sua stessa natura, fortemente eterogenea. L'applicazione delle teorie volte alla determinazione della compatibilità granulometrica tra i diversi elementi della discarica porta a risultati considerevolmente diversi a seconda della curva di distribuzione granulometrica adottata per il rifiuto. Nel corso della tesi la descrizione di questo è stata fatta seguendo il criterio della maggior cautela e scegliendo quindi, all'interno del fuso tracciato da *Jessberger*, la curva di distribuzione granulometrica più critica per la posizione ricoperta dal rifiuto nel sistema filtrante, ossia la curva che delimita superiormente il fuso quando il rifiuto funge da materiale di base e quella che lo delimita inferiormente quando invece si analizza la capacità di questo di trattenere le particelle che appartengono agli strati sovrastanti.

Nei materiali internamente stabili non coesivi le sollecitazioni causate da vibrazioni e moti di filtrazione non ne alterano la distribuzione granulometrica. Le particelle che costituiscono la struttura primaria del materiale e attraverso cui sono trasferiti gli sforzi tensionali si dispongono in modo ta-

le da realizzare delle costrizioni in grado di arrestare parte delle particelle mobili. A loro volta le particelle arrestate formano costrizioni in grado di trattenere parte delle frazioni più fini e così via fino a che anche le particelle più fini che costituiscono il materiale vengono arrestate.

Qualora il materiale di base fosse internamente stabile e non coesivo è quindi sufficiente che le costrizioni del filtro siano abbastanza minute da trattenere la struttura primaria. Con materiali di base coesivi, qual è, per esempio, la barriera minerale posta in copertura di una discarica per rifiuti solidi urbani, è invece necessario che si formino nel filtro costrizioni di dimensioni inferiori a quelle delle particelle del materiale di base più piccole che si desidera non vengano erose. Per effetto della coesione, infatti, le fessure che si creano all'interno del materiale di base sono capaci di autosostenersi, realizzando una via preferenziale attraverso cui avviene l'erosione delle particelle.

Nel corso dei capitoli 5 e 6 si sono presentate alcune soluzioni progettuali per realizzare l'interfaccia tra barriera minerale e rifiuto in copertura e tra rifiuto e barriera di confinamento nel fondo, analizzando per ciascuna di queste quali fossero le prestazioni ottenibili in termini di compatibilità granulometrica e di proprietà idrauliche. Mentre in copertura la progettazione dell'interfaccia è volta a limitare il più possibile l'erosione del materiale di base (la barriera minerale), nel fondo la priorità è invece quella di contrastare l'intasamento dello strato filtrante, destinato al drenaggio del percolato.

Il procedimento adottato di analisi delle soluzioni che prevedono uno o più strati filtranti in materiale granulare è consistito nel controllare innanzitutto che le relative curve di distribuzione granulometrica siano verificate contro fenomeni di instabilità interna utilizzando i criteri di *Kezdi* e *Kenney* e *Lau* e, successivamente, nell'effettuare un'analisi di compatibilità granulometrica tra gli strati adiacenti impiegando i criteri di *Terzaghi* e di *Musso e Federico*, considerando però nell'applicazione di quest'ultimo, per determinare la probabilità di occorrenza di una certa costrizione, la distribuzione

percentuale delle particelle basata sulla loro superficie esterna piuttosto che sul loro numero. Il modello originariamente proposto da *Musso* e *Federico* considera particelle disposte secondo la configurazione tetraedrica, ossia di massima densità. Nelle analisi effettuate nel corso della tesi è stata inoltre valutata anche la disposizione cubica, ossia di minima densità, che risulta più cautelativa in quanto le costrizioni che si formano sono più ampie. Qualora gli strati filtranti dovessero anche svolgere una funzione drenante è necessario verificare l'idoneità idraulica di questi al fine di assicurare una trasmissività sufficiente al drenaggio del biogas in copertura e uno spessore liquido massimo del percolato contenuto all'interno dello strato drenante di fondo, considerando dei valori di viscosità cinematica superiori a quelli dell'acqua per tenere conto della presenza nel percolato di materiale soluto e in sospensione.

L'impiego del metodo geometrico probabilistico di *Musso* e *Federico*, rivisitato con le osservazioni di cui si è poc'anzi detto, consente di valutare qual è lo spessore da assegnare a uno strato filtrante in materiale granulare affinché questo riesca a trattenere, con un certo livello di confidenza, le particelle che costituiscono il materiale di base.

Per sottrarre un volume utile al conferimento dei rifiuti il più limitato possibile è necessario contenere lo spessore degli elementi posti all'interfaccia tra rifiuto e barriera minerale. Per la stessa ragione, nelle discariche per rifiuti solidi urbani pericolosi/non pericolosi che contengono frazioni biodegradabili di entità non trascurabile, è opportuno che la funzione drenante sia affidata agli stessi elementi filtranti, attribuendo a questi i minimi spessori previsti dalla normativa (0,5 metri secondo la legislazione italiana vigente in entrambi i casi).

Interfaccia tra barriera minerale in copertura e rifiuto

Gli studi svolti nel capitolo 5 hanno mostrato che la barriera minerale non può essere posta a diretto contatto con il rifiuto, ma è necessario interporvi un

elemento filtrante. La possibilità di realizzare tale elemento filtrante disponendo unicamente un filtro in geotessile all'interfaccia tra rifiuto e barriera minerale è da adottarsi per le sole discariche per rifiuti inerti, impiegando geotessuti tessuti.

La soluzione che prevede un singolo strato filtrante in materiale granulare appare idonea solamente nel caso di discariche destinate al conferimento di rifiuti non biogassificabili, per le quali non sia quindi necessario provvedere al drenaggio del biogas. L'esigenza di disporre di costrizioni sufficientemente minute da arrestare le particelle più fini della barriera minerale porta ad avere un valore della conducibilità idraulica dello strato insufficiente ad ottenere, entro spessori accettabili, la trasmissività al biogas desiderata. Dai risultati delle analisi di compatibilità granulometrica, adottando la granulometria di figura 5.4, considerato anche l'elevato quantitativo di particelle appartenenti allo strato filtrante prossime all'interfaccia che possono essere erose non trovando costrizioni sufficientemente minute nel rifiuto, è opportuno attribuire allo strato di materiale granulare uno spessore di almeno 25-30 centimetri oltre a quello necessario per provvedere alla regolarizzazione del cumulo di rifiuto.

Una soluzione idonea all'impiego anche in discariche per rifiuti solidi urbani biogassificabili è quella che prevede un filtro in geotessile a contatto con la barriera minerale al di sotto del quale è posto uno strato di materiale granulare che lo protegge dal contatto diretto con il rifiuto. Adottando per questo la granulometria tracciata in giallo nel grafico di figura 5.12, uno spessore di 0,5 metri fornisce una trasmissività di alcuni ordini di grandezza superiore a quella richiesta per un efficace drenaggio del biogas. In tale configurazione l'impiego di un materiale granulare con una curva di distribuzione granulometrica più grossolana rispetto a quella considerata nello studio è da considerarsi generalmente in modo favorevole, essendo comunque la compatibilità granulometrica con la barriera minerale ottenuta per mezzo del geotessile. È comunque opportuno che la granulometria non sia eccessivamente

grossolana per garantire comunque una certa regolarità della superficie su cui poggia il geotessile, rendendo possibile impiegare geotessuto non tessuto, che ha dei costi inferiori ma dispone di una minore resistenza al laceramento rispetto al geotessuto tessuto.

La soluzione che prevede la sovrapposizione di due strati filtranti granulari di differente granulometria, affidando allo strato filtrante superiore il compito di impedire l'erosione delle particelle che costituiscono la barriera minerale e a quello inferiore il raggiungimento della compatibilità granulometrica con il rifiuto e il drenaggio del biogas, seppur teoricamente valida, all'atto pratico non è realizzabile a causa delle eccessive difficoltà che si dovrebbero sostenere per garantire la presenza delle frazioni più fini.

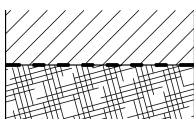
Interfaccia tra rifiuto e barriera di confinamento di fondo

Nelle discariche per rifiuti inerti la realizzazione dell'interfaccia tra barriera di confinamento e rifiuto non richiede lo svolgimento di particolari studi volti ad assicurare la compatibilità granulometrica; è sufficiente interporre uno strato granulare di spessore ridotto tra rifiuto e geomembrana per prevenire la lacerazione di questa in caso di contatto con corpi taglienti presenti nel rifiuto.

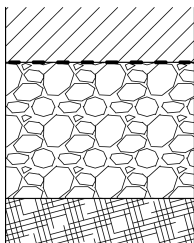
Nelle discariche per rifiuti solidi urbani pericolosi/non pericolosi la progettazione è invece più complessa dovendosi provvedere a interporre, tra rifiuto e barriera di confinamento, uno strato di idonee proprietà idrauliche per provvedere al drenaggio del percolato prodotto all'interno del cumulo di rifiuti. L'impiego in tale posizione di filtri in geotessuto è da escludere a causa dell'elevato contenuto nel percolato di materiale in sospensione, anche di origine organica.

Le analisi sviluppate nel corso del capitolo 6 hanno mostrato come anche la soluzione che prevede un filtro a singolo strato sia inadeguata. Si è infatti osservato come tale configurazione non assicuri una conducibilità idraulica sufficiente qualora si impieghi del materiale sabbioso, mentre sia soggetta

PROGETTAZIONE DELL'INTERFACCIA IN COPERTURA

Discariche per RSU non biogassificabili


L'interfaccia può essere realizzata disponendo tra rifiuto e barriera minerale un geotessuto tessuto.

Discariche per RSU biogassificabili


L'interfaccia può essere realizzata disponendo un geotessuto non tessuto al di sotto del quale si collochi uno strato di materiale granulare di spessore pari ad almeno 50 cm con una curva di distribuzione granulometrica internamente stabile e contenuta nel fuso di seguito indicato.

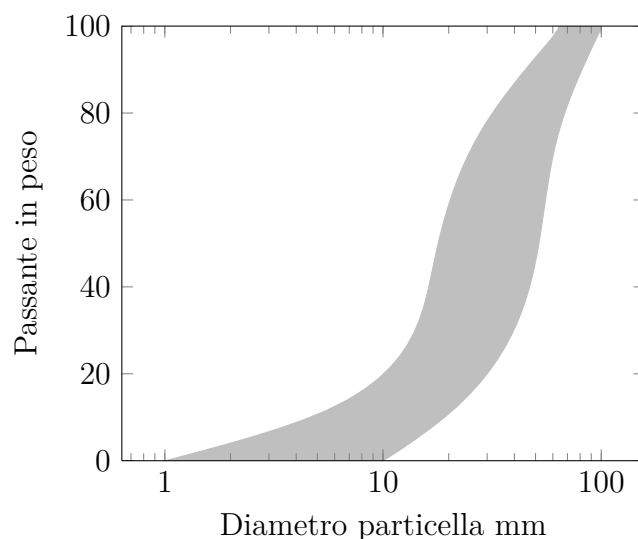


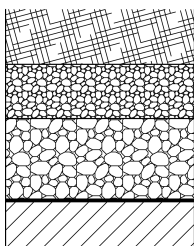
Tabella 7.1: Proposte progettuali per la realizzazione dell'interfaccia in copertura tra barriera minerale e rifiuto in una discarica per rifiuti solidi urbani.

ad occlusione per deposizione delle particelle di rifiuto erose quando siano impiegate granulometrie più grossolane.

La soluzione più idonea appare quella che prevede un filtro costituito da due strati sovrapposti di differente granulometria dove lo strato inferiore è destinato al drenaggio del percolato, mentre lo strato sovrastante ha il compito di trattenere le particelle del rifiuto più grossolane che troverebbero altrimenti costrizioni in grado di arrestarle nello strato inferiore provocandone una progressiva occlusione. Impiegando le curve di distribuzione granulometrica proposte in figura 6.10, può attribuirsi allo strato superiore uno spessore di 20 centimetri e di 30 centimetri per lo strato inferiore, che risulta così in grado di smaltire portate di percolato associate ad eventi piovosi con elevato tempo di ritorno e con valori di viscosità considerevolmente superiori a quelli propri dell'acqua a temperatura ambiente.

Nella valutazione delle possibili soluzioni per la realizzazione delle interfacce con il rifiuto all'interno di una discarica si è cercato di mantenere un approccio generale, così che i risultati possano essere impiegati in un numero di casi reali il più largo possibile. L'assunzione più vincolante che ha portato alla definizione delle soluzioni progettuali esposte è relativa alla pendenza del fondo. Per tale grandezza un valore del 5% rappresenta comunque un limite inferiore nella pratica ingegneristica attuale. Quando sono infatti adottate pendenze inferiori la funzione di drenaggio del percolato non è generalmente raggiunta esclusivamente con la permeazione attraverso lo strato di materiale granulare, ma a questo sono affiancati dei tubi fessurati posti con un certo intervallo lungo le falde che costituiscono il fondo della discarica.

PROGETTAZIONE DELL'INTERFACCIA AL FONDO



L'interfaccia al fondo può essere realizzata disponendo tra rifiuto e barriera di confinamento due strati di materiale granulare con le curve di distribuzione granulometrica qui sotto riportate, impiegando per lo strato superiore la granulometria più fine e per lo strato inferiore quella più grossolana. Si consigliano uno spessore di almeno 20 cm per lo strato superiore e di almeno 30 cm per lo strato inferiore.

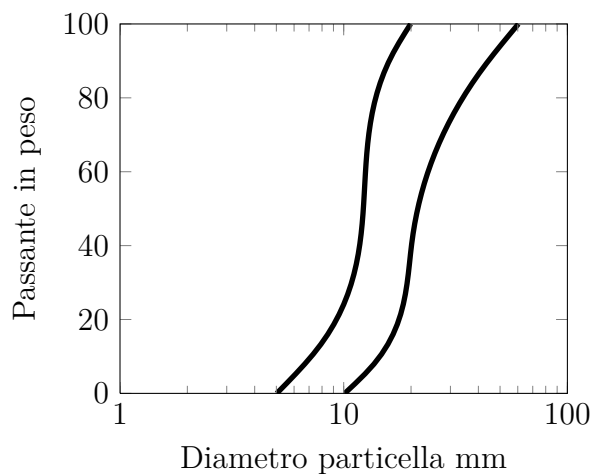


Tabella 7.2: Proposte progettuali per la realizzazione dell'interfaccia al fondo tra rifiuto e barriera di confinamento di una discarica per rifiuti solidi urbani.

Appendice A

Programmi di calcolo

Si riportano di seguito i listati dei programmi di calcolo impiegati nel corso della tesi per valutare la compatibilità granulometrica tra strati di differente granulometria e per eseguire le verifiche di stabilità interna. Il linguaggio di programmazione utilizzato è il *Fortran 90*.

A.1 Implementazione del metodo di *Musso e Federico*

```
1 program mussofederico
2 implicit none
3 real*8 gr_p(1000,2),d,gr(1000,6)
4 real*8 somma,dens_rel,m,conf,csd_dr_r(10000,6),percorso1
   ,percorso2,percorso3,dmedio1,dmedio2,dmedio3
5 real*8 clas(1000,2),matr_comb_clas(1000,8),csd_ld
   (1000,2)
6 real*8 csd_md(1000,2),csd_md_c(1000,2),csd_ld_c(1000,2),
   csd_md_r(1000,6),csd_ld_r(1000,6),csd_dr_c(10000,2),
   temp1,temp2
7 real*8 clasn(1000,2),gr_pb(1000,2),grb(1000,6),interv
```



```
8 integer n_p,n_r,ios,i,j,nclassi,k,matr_comb(1000,4),c,id
   ,n_classi !, matr_occ(1000,1000),conta_o
9 integer denom(1000),c_ld,c_md,c_dr,sudd,ii,n_b,numcsd
10 integer*8 fatt
11      ! acquisizione dati
12      open(1,file='datifiltro.txt',status='old')
13      ios=0
14      n_p=0
15      do while (ios==0)
16          read(1,*,iostat=ios)
17          n_p=n_p+1
18      end do
19      write(6,*)n_p
20      rewind(1)
21      do i=1,n_p
22          read(1,*) (gr_p(i,j), j=1,2)
23      end do
24      write(6,*)'granulometria filtro'
25      do i=1,n_p
26          write(6,*)gr_p(i,1),',',gr_p(i,2)
27      end do
28      close(1)
29      open(2,file='datibase.txt',status='old')
30      ios=0
31      n_b=0
32      do while (ios==0)
33          read(2,*,iostat=ios)
34          n_b=n_b+1
35      end do
36      write(6,*)n_b
37      rewind(2)
38      do i=1,n_b
```

A.1. IMPLEMENTAZIONE DEL METODO DI MUSSO E FEDERICO105

```
39         read(2,*) (gr_pb(i,j), j=1,2)
40     end do
41     write(6,*) 'granulometria base'
42     do i=1,n_b
43         write(6,*) gr_pb(i,1),',',gr_pb(i,2)
44     end do
45 close(2)
46 !ordinamento dei dati e determinazione delle
equazioni dei segmenti di retta che collegano i
punti dati
47 call ordina_matr(gr_p,n_p,1)
48 call ordina_matr(gr_pb,n_b,1)
49 call curva_gran(gr,gr_p,n_p)
50 call curva_gran(grb,gr_pb,n_b)
51 !scelta della distribuzione di frequenza per la
definizione della curva di distribuzione delle
costrizioni
52 !id=1 distribuzione frequenza massa
53 !id=2 distribuzione frequenza superficie esterna
54 !id=3 distribuzione frequenza numero particelle
55 id=2
56 !determinazione delle classi da cui si realizza la
CDC
57 n_classi=10
58 call classi(gr,n_p,clas,n_classi,id)
59 !calcolo CDC per il caso con struttura a minima
densità
60 k=4
61 call combinazioni(matr_comb,n_classi,k,c_ld)
62 do i=1,c_ld
63     do j=1,k
64         matr_comb_clas(i,j)=clas(matr_comb(i,j),1)
```

```

65         matr_comb_clas(i,k+j)=clas(matr_comb(i,j),2)
66     end do
67 end do
68 call occorrenze(denom,n_classi,c_ld,k,matr_comb)
69 call costr_csd_ld(csd_ld,c_ld,matr_comb_clas,denom)
70 call ordina_matr(csd_ld,c_ld,1)
71 call cumulata(csd_ld_c,csd_ld,c_ld)
72 !controllo somma delle probabilità uguale a 1
73 call controllo_somma(csd_ld,c_ld,somma)
74 write(6,*)'somma probabilità csd_ld',somma
75 !calcolo CDC per il caso con struttura a massima
   densità
76 k=3
77 call combinazioni(matr_comb,n_classi,k,c_md)
78 do i=1,c_md
79     do j=1,k
80         matr_comb_clas(i,j)=clas(matr_comb(i,j),1)
81         matr_comb_clas(i,k+j)=clas(matr_comb(i,j),2)
82     end do
83 end do
84 call occorrenze(denom,n_classi,c_md,k,matr_comb)
85 call costr_csd_md(csd_md,c_md,matr_comb_clas,denom)
86 call ordina_matr(csd_md,c_md,1)
87 call cumulata(csd_md_c,csd_md,c_md)
88 !controllo somma delle probabilità uguale a 1
89 call controllo_somma(csd_md,c_md,somma)
90 write(6,*)'somma probabilità csd_md',somma
91 write(6,*)'densità relativa=?'
92 read(5,*)dens_rel
93 !numcsd indica la definizione adottata per il
   calcolo della CDC con densità relativa intermedia
94 numcsd=10000

```

A.1. IMPLEMENTAZIONE DEL METODO DI MUSSO E FEDERICO

```
95     call costruzione_csd_dr(csd_dr_c,csd_dr_r,csd_ld_c ,
        csd_md_c,c_ld,c_md,dens_rel,c_dr,numcsd)
96     write(6,*)'----'
97     write(6,*)'livello di confidenza=?'
98     read(5,*)conf
99     write(6,*)'numero dei punti che discretizzano la CDC
        =?'
100    read(5,*)sudd
101    interv=((log10(gr_pb(n_b,1))-log10(gr_pb(1,1)))/sudd
        )
102    !creazione file di output
103    open(3,file='MigrL_risultati.txt',status='new')
104    open(7,file='MigrL_risultati2.txt',status='new')
105    write(3,*)
106    write(3,*)'cdc filtro'
107    do i=1,c_dr
108        write(3,*)csd_dr_c(i,1),csd_dr_c(i,2)
109    end do
110    write(3,*)'granulometria del filtro'
111    do i=1,n_p
112        write(3,*)gr_p(i,1),gr_p(i,2)
113    end do
114    write(3,*)
115    write(3,*)'granulometria base'
116    do i=1,n_b
117        write(3,*)gr_pb(i,1),gr_pb(i,2)
118    end do
119    write(3,*)
120    write(3,*)'diametro confronti aritm.pond.
        geometrica wittmann'
121    write(7,*)'diametro confronti aritm.pond.
        geometrica wittmann'
```

```

122      do ii=0,sudd
123          d=10**((log10(gr_pb(1,1))+ii*interv)
124          write(6,*)'d=',d,'ii=',ii,'gr_pb(n_b,1)',gr_pb(
              n_b,1),'gr_pb(1,1)',gr_pb(1,1),'interv',
              interv
125          call confronti(m,csd_dr_r,c_dr-1,d,conf)
126          write(6,*)'m=',m
127          !percorso con media aritmetica ponderata
128          dmedio1=0
129          do i=1,n_classi
130              dmedio1=dmedio1+clas(i,1)*clas(i,2)
131          end do
132          percorso1=dmedio1*m
133          !percorso con media geometrica
134          dmedio2=1
135          do i=1,n_classi
136              dmedio2=dmedio2*clas(i,1)
137          end do
138          dmedio2=dmedio2**(1./n_classi)
139          percorso2=dmedio2*m
140          !percorso secondo Wittmann
141          call classi(gr,n_p,clasn,n_classi,3)
142          temp1=0
143          temp2=0
144          do i=1,n_classi
145              temp1=temp1+clasn(i,1)**3*clasn(i,2)
146              temp2=temp2+clasn(i,1)**2*clasn(i,2)
147          end do
148          dmedio3=temp1/temp2
149          percorso3=dmedio3*m
150          write(3,*)d,m,percorso1,percorso2,percorso3
151          write(7,*)d,m,percorso1,percorso2,percorso3

```

A.1. IMPLEMENTAZIONE DEL METODO DI MUSSO E FEDERICO109

```
152     end do
153     close(3)
154     close(7)
155 end program
156
157
158 subroutine classi(gr,n_p,clas,n_classi,id)
159 !individua le classi con cui è approssimata la
   granulometria del filtro
160 implicit none
161 real*8 gr(1000,6),x_max,x_min,clas(1000,2),x1,x2,temp2,
   temp3
162 integer n_p,n_classi,i,j,n1,n2,id
163     x_max=gr(n_p-1,3)
164     x_min=gr(1,1)
165     temp2=0
166     temp3=0
167     do i=1,n_classi
168         clas(i,1)=10**((log10(x_min)+(i-1)*log10(x_max/
   x_min)/n_classi+log10(x_max/x_min)/n_classi
   /2.))
169         x1=10**((log10(clas(i,1))-log10(x_max/x_min)/
   n_classi/2.))
170         x2=10**((log10(clas(i,1))+log10(x_max/x_min)/
   n_classi/2.))
171         n1=1
172         n2=n_p-1
173         do j=1,n_p-1
174             if (x1>gr(j,1) .and. x1<=gr(j,3)) then
175                 n1=j
176             end if
177             if (x2>gr(j,1) .and. x2<=gr(j,3)) then
```

```

178             n2=j
179         end if
180     end do
181     clas(i,2)=(-gr(n1,5)*log10(x1)-gr(n1,6)+gr(n2,5)
               *log10(x2)+gr(n2,6))/100
182     temp2=temp2+clas(i,2)/clas(i,1)
183     temp3=temp3+clas(i,2)/clas(i,1)**3
184 end do
185 if (id/=1) then
186     do i=1,n_classi
187         if (id==2) then
188             clas(i,2)=clas(i,2)/clas(i,1)/temp2
189         else if (id==3) then
190             clas(i,2)=clas(i,2)/clas(i,1)**3/temp3
191         end if
192     end do
193 end if
194 end subroutine classi
195
196
197 subroutine curva_gran(gr,gr_p,n_p)
198 !crea una matrice in cui, per ogni segmento di retta che
           collega i punti rappresentativi della granulometria,
           ne sono memorizzati gli estremi, il coefficiente
           angolare e l'intercetta
199 implicit none
200 real*8 gr(1000,6),gr_p(1000,2)
201 integer i,n_p
202     do i=1,n_p-1
203         gr(i,1)=gr_p(i,1)
204         gr(i,2)=gr_p(i,2)
205     end do

```

A.1. IMPLEMENTAZIONE DEL METODO DI MUSSO E FEDERICO111

```
206     gr(n_p-1,3)=gr_p(n_p,1)
207     gr(n_p-1,4)=gr_p(n_p,2)
208     do i=1,n_p-2
209         gr(i,3)=gr(i+1,1)
210         gr(i,4)=gr(i+1,2)
211         gr(i,5)=(gr(i,4)-gr(i,2))/(log10(gr(i,3))-log10(
                gr(i,1)))
212         gr(i,6)=gr(i,2)-gr(i,5)*log10(gr(i,1))
213     end do
214     gr(n_p-1,5)=(gr(n_p-1,4)-gr(n_p-1,2))/(log10(gr(n_p
        -1,3))-log10(gr(n_p-1,1)))
215     gr(n_p-1,6)=gr(n_p-1,2)-gr(n_p-1,5)*log10(gr(n_p
        -1,1))
216 end subroutine curva_gran
217
218
219 subroutine ordina_matr(v,n,id)
220 !consente di ordinare una matrice v(1000,2) sulla base
        del valore contenuto nella prima colonna la variabile
        di passaggio n indica il numero di elementi della
        matrice
221 !se id=1 -> ordinamento crescente
222 !se id=0 -> ordinamento decrescente
223 implicit none
224 real*8 v(1000,2),vx,vy
225 integer n,i,j,k,id
226     do i=1,n-1
227         vx=v(i,1)
228         k=i
229         if (id==0) then
230             do j=i+1,n
231                 if (v(j,1)>vx) then
```



```
232             k=j
233             vx=v(j,1)
234         end if
235     end do
236     else if (id==1) then
237         do j=i+1,n
238             if (v(j,1)<vx) then
239                 k=j
240                 vx=v(j,1)
241             end if
242         end do
243     end if
244     vx=v(k,1)
245     vy=v(k,2)
246     v(k,1)=v(i,1)
247     v(k,2)=v(i,2)
248     v(i,1)=vx
249     v(i,2)=vy
250 end do
251 end subroutine ordina_matr
252
253
254 function conta_o(i,j,matr,k)
255     !conta il numero di occorrenze j alla riga i-esima della
256     matrice matr con k colonne
257     implicit none
258     integer matr(1000,4)
259     integer i,j,m,k,conta_o
260     conta_o=0
261     do m=1,k
262         if (matr(i,m)==j) then
```

A.1. IMPLEMENTAZIONE DEL METODO DI MUSSO E FEDERICO113

```
263             conta_o=conta_o+1
264         end if
265     end do
266 end function conta_o
267
268
269 function fatt(n)
270     !calcola il fattoriale
271     implicit none
272     integer n,i
273     integer*8 fatt
274     if (n==0) then
275         fatt=1
276     else
277         fatt=1
278         do i=1,n
279             fatt=fatt*(i)
280         end do
281     end if
282 end function fatt
283
284
285 subroutine combinazioni(v,n,k,c)
286     !determina tutte le possibili combinazioni di n elementi
287     in classe k
288     implicit none
289     integer v(1000,4),j,k,i,c,h,n,l,nxt
290     integer*8 fatt
291     c=fatt(n+k-1)/(fatt(n-1)*fatt(k))
292     v(1,1)=1
293     v(1,2)=1
294     v(1,3)=1
```

```

294     v(1,4)=1
295     do i=2,c
296         do j=1,k
297             v(i,j)=v(i-1,j)
298         end do
299         nxt=0
300         do j=1,k
301             if ((v(i,j)==n) .and. (nxt==0)) then
302                 nxt=j
303             end if
304         end do
305         if (nxt==0) then
306             v(i,k)=v(i,k)+1
307         else
308             v(i,nxt-1)=v(i,nxt-1)+1
309             do h=nxt,k
310                 v(i,h)=v(i,nxt-1)
311             end do
312         end if
313     end do
314 end subroutine combinazioni
315
316
317 subroutine occorrenze(denom,n,c,k,matr)
318 !valuta quante volte ciascun elemento appare in ogni
319 combinazione e determina il denominatore nell'
320 espressione di Silveira per il calcolo della
321 probabilità di ciascuna costrizione
319 implicit none
320 integer matr_occ(1000,1000),matr(1000,4),denom(1000)
321 integer i,k,n,c,j,conta_o
322 integer*8 fatt

```

A.1. IMPLEMENTAZIONE DEL METODO DI MUSSO E FEDERICO115

```
323     denom=1
324     do i=1,c
325         denom(i)=1
326         do j=1,n
327             matr_occ(i,j)=conta_o(i,j,matr,k)
328             denom(i)=denom(i)*fatt(matr_occ(i,j))
329         end do
330     end do
331 end subroutine occorrenze
332
333
334 subroutine costr_csd_ld(csd_ld,c_ld,matr_comb_clas,denom
335 )
336 !determina la CDC nella configurazione a minima densità
337 implicit none
338 real*8 d1,d2,d3,d4,areav,areav_ld,alpha,alpha_min,
339         alpha_max,alpha_ld,a,b,c,d
340 real*8 r1,r2,r3,r4,w_div,beta,gamma,delta,p1,p2,areaq,x,
341         beta_ld,gamma_ld,delta_ld,x_ld
342 integer i,n_div,c_ld,ii,denom(1000)
343 integer*8 fatt
344 real*8 csd_ld(1000,2),matr_comb_clas(1000,8)
345 real*8 :: pigreco
346 parameter (pigreco=3.141593)
347 do i=1,c_ld
348     r1=matr_comb_clas(i,1)*0.5
349     r2=matr_comb_clas(i,2)*0.5
350     r3=matr_comb_clas(i,3)*0.5
351     r4=matr_comb_clas(i,4)*0.5
352     a=r1+r2
353     b=r2+r3
354     c=r3+r4
```

```

352      d=r1+r4
353      alpha_max=(acos(((a**2)+(r1+r3)**2-b**2)/(2*a*(
          r1+r3)))+acos((d**2+(r1+r3)**2-c**2)/(2*d*(r1
          +r3))))*180/pigreco
354      alpha_min=(acos((a**2+d**2-(r2+r4)**2)/(2*a*d)))
          *180/pigreco
355      if (alpha_max-alpha_min<1.) then
356          n_div=10
357      else
358          n_div=int(ceiling((alpha_max-alpha_min)*10))
359      end if
360      w_div=(alpha_max-alpha_min)/n_div
361      alpha_ld=0
362      areav_ld=0
363      do ii=0,n_div
364          alpha=alpha_min+ii*w_div
365          x=(a**2+d**2-2*a*d*cos(alpha/180*pigreco))
          **0.5
366          gamma=acos((c**2+b**2-x**2)/(2*c*b))*180/
          pigreco
367          beta=asin(d/x*sin(alpha/180*pigreco))*180/
          pigreco+asin(c/x*sin(gamma/180*pigreco))
          *180/pigreco
368          delta=asin(a/x*sin(alpha/180*pigreco))*180/
          pigreco+asin(b/x*sin(gamma/180*pigreco))
          *180/pigreco
369          p1=(a+d+x)*0.5
370          p2=(b+c+x)*0.5
371          areaq=(p1*(p1-a)*(p1-d)*(p1-x))**0.5+(p2*(p2
          -b)*(p2-c)*(p2-x))**0.5
372          areav=areaq-pigreco/360*(r1**2*alpha+r2**2*
          beta+r3**2*gamma+r4**2*delta)

```

A.1. IMPLEMENTAZIONE DEL METODO DI MUSSO E FEDERICO117

```
373         if (areav>areav_ld) then
374             alpha_ld=alpha
375             areav_ld=areav
376             beta_ld=beta
377             gamma_ld=gamma
378             delta_ld=delta
379             x_ld=x
380         end if
381     end do
382     !la matrice csd_ld contiene le coordinate della
      CDC
383     csd_ld(i,1)=(4*areav_ld/pigreco)**0.5
384     csd_ld(i,2)=fatt(4)/denom(i)*matr_comb_clas(i,5)
      *matr_comb_clas(i,6)*matr_comb_clas(i,7)*
      matr_comb_clas(i,8)
385 end do
386 end subroutine costr_csd_ld
387
388
389 function funzione(d1,d2,d3,dv)
390 !è la funzione impiegata per il calcolo del diametro
      della costrizione nella configurazione a massima
      densità
391 implicit none
392 real*8 d1,d2,d3,dv,funzione
393     funzione=(2/d1)**2+(2/d2)**2+(2/d3)**2+(2/dv)
      **2-0.5*(2/d1+2/d2+2/d3+2/dv)**2
394 end function funzione
395
396
397 subroutine costr_csd_md(csd_md,c_md,matr_comb_clas,denom
      )
```

```

398  !determina la CDC nella configurazione a massima densità
      impiega il metodo della bisezione per valutare la
      soluzione della funzione
399  implicit none
400  real*8 a,b,c,d
401  real*8 r1,r2,r3,rv,w_div,r_min,r_max,u
402  real*8 d_min,d_max,dv,d1,d2,d3,funzione,tol
403  integer i,n_div,c_md,ii,k,denom(1000)
404  integer*8 fatt
405  real*8 csd_md(1000,2),matr_comb_clas(1000,8)
406  real*8 :: pigreco
407  parameter (pigreco=3.141593)
408      do i=1,c_md
409          d1=matr_comb_clas(i,1)
410          d2=matr_comb_clas(i,2)
411          d3=matr_comb_clas(i,3)
412          d_min=1E-20
413          d_max=min(d1,d2,d3)
414          tol=1E-12
415          u=1
416          do while (d_max-d_min>tol)
417              dv=(d_max+d_min)/2
418              u=funzione(d1,d2,d3,dv)
419              if (funzione(d1,d2,d3,d_min)*funzione(d1,d2,
420                  d3,dv)<1) then
421                  d_max=dv
422              else if (funzione(d1,d2,d3,d_max)*funzione(
423                  d1,d2,d3,dv)<1) then
424                  d_min=dv
425              end if
          end do
          csd_md(i,1)=dv

```

A.1. IMPLEMENTAZIONE DEL METODO DI MUSSO E FEDERICO119

```
426      csd_md(i,2)=fatt(3)/denom(i)*matr_comb_clas(i,4)
      *matr_comb_clas(i,5)*matr_comb_clas(i,6)
427  end do
428  !la matrice csd_md contiene le coordinate della CSD
      per la struttura a massima densità
429 end subroutine costr_csd_md
430
431
432 subroutine controllo_somma(csd,c,somma)
433 !esegue la sommatoria delle probabilità di occorrenza di
      ciascuna costrizione con finalità di controllo
434 real*8 csd(1000,2),somma
435 integer c
436     somma=0
437     do i=1,c
438         somma=somma+csd(i,2)
439     end do
440 end subroutine controllo_somma
441
442
443 subroutine cumulata(csd_c,csd,c)
444 !calcola la probabilità cumulata di occorrenza delle
      costrizioni
445 real*8 csd(1000,2),csd_c(1000,2),temp,rapp
446 integer c
447     temp=0
448     do i=1,c
449         csd_c(i,1)=csd(i,1)
450         temp=temp+csd(i,2)
451         csd_c(i,2)=temp
452     end do
453     rapp=1/csd_c(c,2)
```



```
454      do i=1,c
455          csd_c(i,2)=csd_c(i,2)*rapp
456      end do
457  end subroutine cumulata
458
459
460  subroutine interpolata_csd(csd_r,csd_c,c)
461  !determina le equazioni dei segmenti di retta condotti
      tra i punti che discretizzano la curva di
      distribuzione delle costrizioni
462  real*8 csd_c(1000,2),csd_r(1000,6),temp(1000,4)
463  integer i,c,j,n
464      do i=1,c-1
465          csd_r(i,1)=csd_c(i,1)
466          csd_r(i,2)=csd_c(i,2)
467          csd_r(i,3)=csd_c(i+1,1)
468          csd_r(i,4)=csd_c(i+1,2)
469      end do
470      temp(1,1)=csd_r(1,1)
471      temp(1,2)=csd_r(1,2)
472      temp(1,3)=csd_r(1,3)
473      temp(1,4)=csd_r(1,4)
474      j=1
475      do i=2,c
476          if (csd_r(i,1)/=csd_r(i,3)) then
477              j=j+1
478              temp(j,1)=csd_r(i,1)
479              temp(j,2)=temp(j-1,4)
480              temp(j,3)=csd_r(i,3)
481              temp(j,4)=csd_r(i,4)
482          end if
483      end do
```

A.1. IMPLEMENTAZIONE DEL METODO DI MUSSO E FEDERICO121

```
484     n=j
485     do i=1,n
486         csd_r(i,1)=temp(i,1)
487         csd_r(i,2)=temp(i,2)
488         csd_r(i,3)=temp(i,3)
489         csd_r(i,4)=temp(i,4)
490         csd_r(i,5)=(temp(i,4)-temp(i,2))/(temp(i,3)-temp
            (i,1))
491         csd_r(i,6)=temp(i,2)-csd_r(i,5)*temp(i,1)
492     end do
493     c=n
494 end subroutine interpolata_csd
495
496
497 subroutine costruzione_csd_dr(csd_dr_c,csd_dr_r,csd_ld_c
    ,csd_md_c,c_ld,c_md,dens_rel,c_dr,n)
498 !calcola la curva di distribuzione delle costrizioni
    alla densità relativa dens_rel a partire dalle curve
    di distribuzione delle costrizioni nei casi di
    filtro disposto secondo le configurazioni a minima e
    a massima densità
499 implicit none
500 real*8 csd_dr_c(10000,2),csd_ld_c(1000,2),csd_md_c
    (1000,2),dens_rel,csd_ld_r(1000,6),csd_md_r(1000,6)
501 real*8 w_div,y,csd_dr_r(10000,6),dcd,dcl
502 integer n_md,n_ld,c_ld,c_md,i,j,div,c_dr,n
503     call interpolata_csd(csd_ld_r,csd_ld_c,c_ld)
504     call interpolata_csd(csd_md_r,csd_md_c,c_md)
505     div=n
506     w_div=1./div
507     y=0
508     n_ld=1
```

```

509      n_md=1
510      do i=1,div
511          y=i*w_div
512          do j=1,c_ld
513              if (y>csd_ld_r(j,2) .and. y<=csd_ld_r(j,4))
514                  then
515                      n_ld=j
516                  end if
517              end do
518              do j=1,c_md
519                  if (y>csd_md_r(j,2) .and. y<=csd_md_r(j,4))
520                      then
521                          n_md=j
522                      end if
523                  end do
524                  dcl=(y-csd_ld_r(n_ld,6))/csd_ld_r(n_ld,5)
525                  dcd=(y-csd_md_r(n_md,6))/csd_md_r(n_md,5)
526                  if (y<csd_md_r(1,2)) then
527                      dcd=csd_md_r(1,1)
528                  end if
529                  if (y<csd_ld_r(1,2)) then
530                      dcl=csd_ld_r(1,1)
531                  end if
532                  csd_dr_c(i,1)=dcd+y*(1-dens_rel)*(dcl-dcd)
533                  csd_dr_c(i,2)=y
534              end do
535          c_dr=div
536          do i=1,c_dr-1
537              csd_dr_r(i,1)=csd_dr_c(i,1)
538              csd_dr_r(i,3)=csd_dr_c(i+1,1)
539              csd_dr_r(i,2)=csd_dr_c(i,2)
540              csd_dr_r(i,4)=csd_dr_c(i+1,2)

```

A.1. IMPLEMENTAZIONE DEL METODO DI MUSSO E FEDERICO¹²³

```
539     end do
540     do i=1,c_dr-1
541         csd_dr_r(i,5)=(csd_dr_r(i,4)-csd_dr_r(i,2))/(
                    csd_dr_r(i,3)-csd_dr_r(i,1))
542         csd_dr_r(i,6)=csd_dr_r(i,2)-csd_dr_r(i,5)*
                    csd_dr_r(i,1)
543     end do
544 end subroutine costruzione_csd_dr
545
546
547 subroutine confronti(m,csd_r,c,d,conf)
548 !valuta il numero di confronti necessari ad arrestare
una particella all'interno del filtro; m assume un
valore negativo quando non esistono costrizioni nel
filtro sufficientemente minute da arrestare la
particella di materiale di base considerata
549 implicit none
550 real*8 m,csd_r(10000,6),d,conf
551 integer i,c,n
552     if (d>csd_r(c,3)) then
553         m=0
554     else if (d<csd_r(1,1)) then
555         m=-1
556     else
557         do i=1,c
558             if (d>=csd_r(i,1).and.d<=csd_r(i,3)) then
559                 n=i
560             end if
561         end do
562         m=log(1-conf)/log(1-(csd_r(n,5)*d+csd_r(n,6)))
563     end if
564 end subroutine confronti
```

A.2 Implementazione del metodo di *Kezdi*

```

1  program kezdi
2  implicit none
3  real gr_p(100,2),d,gr_r(100,2),gr_p_u(100,2),gr_p_l
      (100,2),gr_r_u(100,2),gr_r_l(100,2),d_u_15,d_l_85
4  real terzaghi_coeff
5  real dim_grani,ddiv
6  integer n,ios,i,j,n_u,n_l,nsep
7      !acquisizione dati
8      call conta_elementi(n)
9      open(12,file='dati.txt',status='old')
10         do i=1,n
11             read (12,*) (gr_p(i,j), j=1,2)
12             write (6,*) (gr_p(i,j), j=1,2)
13         end do
14     close(12)
15     call ordina_matr(gr_p,n)
16     call curva_gr(gr_p,gr_r,(n-1))
17     call passante_nullo(gr_p,gr_r,n)
18     !creazione dei file dove sono memorizzati i
       risultati
19     open(3,file='terzaghi_res.txt',status='new')
20     open(4,file='terzaghi_res2.txt',status='new')
21     write(3,*)'d','D15','d85','terzaghi_coeff'
22     !la curva di distribuzione granulometrica è
       suddivisa in una frazione fine e in una frazione
       grossa facendo variare il diametro di
       suddivisione.
23     nsep=200
24     ddiv=(log10(gr_p(1,1))-log10(gr_p(n,1)))/nsep
25     do i=0,nsep

```

```

26      d=10**(log10(gr_p(n,1))+i*ddiv)
27      call dividi_gr(gr_p,gr_r,d,gr_p_u,gr_p_l,n,n_u,
          n_l)
28      call curva_gr(gr_p_u,gr_r_u,(n_u-1))
29      call curva_gr(gr_p_l,gr_r_l,(n_l-1))
30      !valutati il passante al 15% della frazione
          grossa e il passante all'85% della frazione
          fine è possibile determinare il rapporto D15/
          d85
31      d_u_15=dim_grani(15.,gr_p_u,gr_r_u,n_u-1)
32      d_l_85=dim_grani(85.,gr_p_l,gr_r_l,n_l-1)
33      terzaghi_coeff=d_u_15/d_l_85
34      !i risultati sono trascritti nei file di output
          al variare del diametro di suddivisione
35      write(3,*)d,d_u_15,d_l_85,terzaghi_coeff
36      write(4,*)'(',d,',',terzaghi_coeff,')'
37      end do
38      close(3)
39  end program
40
41
42  subroutine curva_gr(gr_p,gr_r,n)
43  !la subroutine curva_gr assegna alla prima e alla
          seconda colonna della matrice gr_r rispettivamente la
          pendenza e l'intercetta dei segmenti di retta con
          cui è stata approssimata nel piano semilogaritmico la
          curva granulometrica
44  implicit none
45  real gr_p(100,2),gr_r(100,2)
46  integer n,i
47      do i=1,n

```

```

48         gr_r(i,1)=(gr_p(i,2)-gr_p(i+1,2))/(log10(gr_p(i
           ,1))-log10(gr_p(i+1,1)))
49         gr_r(i,2)=gr_p(i,2)-gr_r(i,1)*log10(gr_p(i,1))
50     end do
51 end subroutine curva_gr
52
53
54 subroutine passante_nullo(gr_p,gr_r,n)
55 !la subroutine passante_nullo stima il diametro
   corrispondente a un passante nullo se tale valore non
   è fornito in input
56 implicit none
57 real gr_p(100,2),gr_r(100,2)
58 integer n
59     if (gr_r((n-1),2)>0) then
60         gr_r(n,1)=gr_p(n,2)/(log10(gr_p(n,1))-log10
           (0.0001))
61         gr_r(n,2)=gr_p(n,2)-gr_r(n,1)*log10(gr_p(n,1))
62     else
63         gr_r(n,1)=gr_r(n-1,1)
64         gr_r(n,2)=gr_r(n-1,2)
65     end if
66     gr_p(n+1,1)=10**(-gr_r(n,2)/gr_r(n,1))
67     gr_p(n+1,2)=0
68 end subroutine passante_nullo
69
70
71 subroutine conta_elementi(n)
72 !la subroutine conta_elementi permette il calcolo del
   numero dei record contenuti nel file di input
73 implicit none
74 real gr(100,2)

```

```
75 integer n,ios
76     ios=0
77     n=0
78     open(11,file='dati.txt',status='old')
79     do while (ios==0)
80         read(11,*,iostat=ios)
81         n=n+1
82     end do
83     close(11)
84 end subroutine conta_elementi
85
86
87 subroutine ordina_matr(v,n)
88 !la subroutine ordina_matr consente di ordinare in
89 ordine decrescente una matrice v(100,2) sulla base
90 del valore contenuto nella prima colonna
89 implicit none
90 real v(100,2),vmaxx,vmaxy
91 integer n,i,j,k
92     do i=1,n-1
93         vmaxx=v(i,1)
94         k=i
95         do j=i+1,n
96             if (v(j,1)>vmaxx) then
97                 k=j
98                 vmaxx=v(j,1)
99             end if
100         end do
101         vmaxx=v(k,1)
102         vmaxy=v(k,2)
103         v(k,1)=v(i,1)
104         v(k,2)=v(i,2)
```



```

105         v(i,1)=vmaxx
106         v(i,2)=vmaxy
107     end do
108 end subroutine ordina_matr
109
110
111 subroutine dividi_gr(gr_p,gr_r,d,gr_p_u,gr_p_l,n,n_u,n_l
    )
112 !suddivide una curva granulometrica in una frazione fine
    e in una frazione grossa usando il diametro d come
    diametro di separazione. Per ciascuna di tali
    frazioni valuta inoltre le curve di distribuzione
    granulometrica
113 implicit none
114 real d,gr_p(100,2),gr_r(100,2),passante_d,gr_pu(100,2),
    gr_p_u(100,2),gr_p_l(100,2)
115 integer i,k,m,n,n_u,n_l
116     k=0
117     do i=1,n+1
118         if (d==gr_p(i,1)) then
119             k=1
120         end if
121     end do
122     write(6,*)'k=',k
123     m=1
124     do i=1,n+1
125         if (d<=gr_p(i,1)) then
126             m=i
127         end if
128     end do
129     passante_d=gr_r(m,1)*log10(d)+gr_r(m,2)
130     if (k==0) then

```

```

131         do i=1,m
132             gr_p_u(i,1)=gr_p(i,1)
133             gr_p_u(i,2)=(gr_p(i,2)-passante_d)*100/(100-
                passante_d)
134         end do
135         gr_p_u(m+1,1)=d
136         gr_p_u(m+1,2)=0
137         gr_p_l(1,1)=d
138         gr_p_l(1,2)=100
139         do i=2,(n+2-m)
140             gr_p_l(i,1)=gr_p(m+i-1,1)
141             gr_p_l(i,2)=gr_p(m+i-1,2)*100/passante_d
142         end do
143         n_u=m+1
144         n_l=n+2-m
145     else
146         do i=1,m
147             gr_p_u(i,1)=gr_p(i,1)
148             gr_p_u(i,2)=(gr_p(i,2)-gr_p(m,2))*100/(100-
                gr_p(m,2))
149         end do
150         do i=1,(n+2-m)
151             gr_p_l(i,1)=gr_p(m+i-1,1)
152             gr_p_l(i,2)=gr_p(m+i-1,2)*100/gr_p(m,2)
153         end do
154         n_u=m
155         n_l=n+2-m
156     end if
157 end subroutine dividi_gr
158
159
160 function dim_grani(percentuale,gr_p,gr_r,n)

```

```
161  !valuta il diametro corrispondente a un certo passante
162  implicit none
163  real percentuale,gr_p(100,2),gr_r(100,2),dim_grani
164  integer n,i,m
165      do i=1,n+1
166          if (percentuale<=gr_p(i,2)) then
167              m=i
168          end if
169      end do
170      dim_grani=10**((percentuale-gr_r(m,2))/gr_r(m,1))
171 end function dim_grani
```

A.3 Implementazione del metodo di *Kenney* e *Lau*

```

1  program kenneylau
2  implicit none
3  real*8 gr_p(10000,2),gr_r(10000,6),dmin,dmax,intv,d,d4,
      hf(10000,2),y,y4
4  integer ios,n_p,i,j,k,ndiv,nd,nd4
5      !acquisizione dati
6      open(1,file='datifiltro.txt',status='old')
7      ios=0
8      n_p=0
9      do while (ios==0)
10         read(1,*,iostat=ios)
11         n_p=n_p+1
12     end do
13     write(6,*)n_p
14     rewind(1)
15     do i=1,n_p
16         read(1,*) (gr_p(i,j), j=1,2)
17     end do
18     close(1)
19     call ordina_matr(gr_p,n_p,1)
20     do i=1,n_p-1
21         gr_r(i,1)=gr_p(i,1)
22         gr_r(i,2)=gr_p(i,2)
23         gr_r(i,3)=gr_p(i+1,1)
24         gr_r(i,4)=gr_p(i+1,2)
25         gr_r(i,5)=(gr_r(i,4)-gr_r(i,2))/(log10(gr_r(i,3))
            )-log10(gr_r(i,1)))
26         gr_r(i,6)=gr_r(i,2)-gr_r(i,5)*log10(gr_r(i,1))
27         write(6,*)(gr_r(i,j),j=1,6)

```

```
28     end do
29     dmin=gr_p(1,1)
30     dmax=gr_p(n_p,1)/4
31     !controlla che la curva granulometrica sia
       sufficientemente ampia per l'applicazione del
       metodo.
32     if (dmin>dmax) then
33         write(6,*)'errore: dmin>dmax'
34     else
35         write(6,*)'discretizzazione?'
36         read(5,*)ndiv
37         intv=(log10(dmax)-log10(dmin))/ndiv
38         !per ogni valore del diametro in cui è
           discretizzata la curva di distribuzione
           granulometrica si calcola il passante e la
           differenza tra questo e il
           passantecorrispondente a un diametro 4 volte
           maggiore
39         do j=1,ndiv
40             d=10**((log10(dmin)+j*intv)
41             d4=4*d
42             nd=1
43             nd4=n_p-1
44             do i=1,n_p-1
45                 if (d>gr_r(i,1) .and. d<=gr_r(i,3)) then
46                     nd=i
47                 end if
48                 if (d4>gr_r(i,1) .and. d4<=gr_r(i,3))
                     then
49                     nd4=i
50                 end if
51             end do
```

```

52         y=gr_r(nd,5)*log10(d)+gr_r(nd,6)
53         y4=gr_r(nd4,5)*log10(d4)+gr_r(nd4,6)
54         hf(j,1)=y4-y
55         hf(j,2)=y
56     end do
57     !trascrizione dei risultati in un file di testi
58     open(3,file='KLrisultati.txt',status='new')
59     do j=1,ndiv
60         write(3,*)(hf(j,k),k=1,2)
61     end do
62     close(3)
63 end if
64 end program
65
66
67 subroutine ordina_matr(v,n,id)
68     !la subroutine ordina_matr consente di ordinare una
        matrice v(1000,2) sulla base del valore contenuto
        nella prima colonna la variabile di passaggio n
        indica il numero di elementi della matrice
69     !se id=1 -> ordinamento crescente
70     !se id=0 -> ordinamento decrescente
71     implicit none
72     real*8 v(10000,2),vx,vy
73     integer n,i,j,k,id
74     do i=1,n-1
75         vx=v(i,1)
76         k=i
77         if (id==0) then
78             do j=i+1,n
79                 if (v(j,1)>vx) then
80                     k=j

```

```
81         vx=v(j,1)
82     end if
83 end do
84 else if (id==1) then
85     do j=i+1,n
86         if (v(j,1)<vx) then
87             k=j
88             vx=v(j,1)
89         end if
90     end do
91 end if
92 vx=v(k,1)
93 vy=v(k,2)
94 v(k,1)=v(i,1)
95 v(k,2)=v(i,2)
96 v(i,1)=vx
97 v(i,2)=vy
98 end do
99 end subroutine ordina_matr
```

Bibliografia

- Alamgir, M. *et al.* (2005), “Integrated Management and Safe Disposal of Municipal Solid Waste in Least Developed Asian Countries. A Feasibility Study”, Khulna University of Engineering and Technology, Khulna, Bangladesh.
- Arulanandan, K., Perry, E. (1983), “Erosion in Relation to Filter Design Criteria in Earth Dams”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(5), 682-698.
- Burenkova, V.V. (1993), “Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils”, *in*: Brauns, J., Schuler, U., “Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering”, A.A. Balkema Publishers, London.
- Burnley, S.J. (2007), “A review of municipal solid waste composition in the United Kingdom”, *Waste Management*, 27(10), 1274-1285.
- Canziani, R., Cossu, R. (1989), “Landfill Hydrology and Leachate Production”, *in*: Christensen, T., “Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact”, Academic Press, London 185-212.
- Chapuis, R.P. (1992), “Similarity of internal stability criteria for granular soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, 29(4), 711-713.
- Collins, H.J., Kölsch, F. (1993), “Identifizierung der Abfälle”, (non pubblicato).

- Comitato Tecnico Discariche (1997), “Linee guida per le discariche controllate di rifiuti solidi urbani”, CISA, Cagliari.
- Da Deppo, L., Datei, C., Salandin, P. (2004), “Sistemazione dei Corsi d’Acqua”, Libreria Internazionale Cortina, Padova.
- Dallo, Y.A.H., Wang, Y. (2012), “Discussion of *A new theoretical method to evaluate the internal stability of granular soils*”, *Canadian Geotechnical Journal*, 49(7), 866-868
- D’Andrea, A. (1999), “Inerti di riciclo: caratteristiche, campi d’impiego”, *Atti del convegno nazionale “Il riciclaggio dei rifiuti inerti in edilizia”*, Palermo.
- de Graauw, A.F., van der Meulen, T., van der Does de Bye, M.R. (1984), “Granular Filters: Design Criteria”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 110(1), 80-96.
- De Stefanis, P., Caggiano, R., Cipriano, V. (2009), “Rapporto sulle tecniche di trattamento dei rifiuti urbani in Italia”, Enea-Federambiente.
- Diaz, L.F., Savage, G.M., Eggerth, L.L. (2005), “Solid Waste Management”, United Nations Environment Programme.
- Dixon, N., Russell, D., Jones, V. (2005), “Engineering properties of municipal solid waste”, *Geotextiles and Geomembranes*, 23(3), 205-233.
- Fell, R. *et al.* (2005), “Geotechnical Engineering of Dams”, A.A. Balkema Publishers, London.
- Gabr, M.A., Valero, N.S. (1995), “Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste”, *Geotechnical Testing Journal*, 18(2), 241-251
- Giroud, J.P., Zornberg, J.G., Zhao, A. (2000), “Hydraulic Design of Geosynthetic and Granular Liquid Collection Layers”, *Geosynthetics International*, 7(4-6), 285-380.

- Gomes, C., Lopes, M.P., Lopes, M.G. (2005), "A study of MSW properties of a Portuguese landfill", *International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of Landfills"*, LIRIGM, Grenoble 1 University, France.
- Hyun Il, P., Borinara, P., Hong, K.D. (2011), "Geotechnical Considerations for End-Use of Old Municipal Solid Waste Landfills", *International Journal of Environmental Research*, 5(3), 573-584.
- Humes, C. (1996), "A New Approach to Compute the Void-Size Distribution Curves of Protective Filters", in: Lafleur, J., Rollin, A.L, "Proceedings of Geofilters '96", Bitech Publishing, Montreal.
- Idraratna, B., Nguyen, V.T., Rujikiatkamjorn, C. (2011), "Assessing the Potential of Internal Erosion and Suffusion of Granular Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(5), 550-554.
- Idraratna, B., Raut, A.K., Khabbaz, H.(2007), "Constriction-Based Retention Criterion for Granular Filter Design", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(3), 266-276.
- John, N.W.M. (1987), "Geotextiles", Blackie, Glasgow.
- Jessberger, H.L. (1994), "Geotechnical aspects of landfill design and construction. Part 2: material parameters and test methods", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering*, 107(2), 105-113.
- Kenney, T.C., Lau, D. (1985), "Internal stability of granular filters", *Canadian Geotechnical Journal*, 22(2), 215-225.
- Kenney, T.C., Lau, D. (1986), "Internal stability of granular filters: Reply", *Canadian Geotechnical Journal*, 23(3), 420-423.

- Kezdi, A. (1969), "Increase of protective capacity of flood control dikes", Department of Geotechnique, Technical University, Budapest, Hungary.
- Koerner, G.R., Koerner, R.M., Martin, J.P. (1994), "Design of Landfill Leachate-Collection Filters", *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(10), 1792-1803.
- Lafleur, J. (1984), "Filter testing of broadly graded cohesionless tills", *Canadian Geotechnical Journal*, 21(4), 634-643.
- Lafleur, J., Mlynarek, J., Rollin, A.L. (1989), "Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(12), 1747-1768.
- Leatherwood, F.N., Peterson, D.F. (1954), "Hydraulic head loss at the interface between uniform sands of different sizes", *Transactions of American Geophysical Union*, 35(4), 588-594.
- Li, M. (2008), "Seepage induced instability in widely graded soils", PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Li, M., Fannin, J. (2008), "Comparison of two criteria for internal stability of granular soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 45(9), 1303-1309.
- Locke, M., Indraratna, B., Adikari, G. (2001), "Time-Dependent Particle Transport through Granular Filters", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(6), 521-528.
- Loebotsjkov, E.A. (1969), "The calculation of suffosion properties of noncohesive soils when using the non-suffosion analog", *International Conference on Hydraulic Research*, Publication of the Technical University of Brno.
- Machado, S.L. *et al.* (2010), "Evaluation of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills", *Waste Management*, 30(12), 2579-2591.

- Manassero, M. *et al.* (1998), "Controlled landfill design (geotechnical aspects)", *in*: Pinto, S.E., "Proceedings of the Third International Congress on Environmental Geotechnics", Balkema, Rotterdam, vol.3, 1001-1038.
- McNally, G.H. (1998), "Soil and Rock Construction Materials", E & FN Spon, London.
- Milligan, V. (1986), "Internal stability of granular filters: Discussion", *Canadian Geotechnical Journal*, 23(3), 414-418.
- Moraci, N., Mandaglio, M.C., Ielo, D. (2012b), "Reply to the discussion by Dallo and Wang on *A new theoretical method to evaluate the internal stability of granular soils*", *Canadian Geotechnical Journal*, 49(7), 869-874.
- Moraci, N., Mandaglio, M.C., Ielo, D. (2012a), "A new theoretical method to evaluate the internal stability of granular soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 49(1), 45-58
- Moraci, N., Tondello, M. (1996), "La progettazione dei filtri nell'ingegneria marittima", *Atti IV Convegno AIOM*, Padova.
- Musso, A., Federico, F. (1983), "Un metodo geometrico-probabilistico per la verifica dei filtri", *Rivista Italiana di Geotecnica*, 4, 177-193.
- Odong, J. (2007), "Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis", *Journal of American Science*, 3(3), 54-60.
- Raut, A.K. (2006), "Mathematical modelling of granular filters and constriction-based filter design criteria", PhD Thesis, University of Wollongong, Australia.
- Rönqvist, H. (2010), "Predicting Surfacing Internal Erosion in Moraine Core Dams", Licentiate Thesis, KTH, Stockholm, Sweden.

- Ruf, J.A. (1974), "Particle Size Spectrum and Compressibility of Raw and Shredded Municipal Solid Waste", PhD Thesis, University of Florida, Gainesville, USA.
- Schuler, U. (1996), "Scattering of the Composition of Soils. An Aspect for the Stability of Granular Filters", *in*: Lafleur, J., Rollin, A.L, "Proceedings of Geofilters '96", Bitech Publishing, Montreal.
- Sherard, J.L. (1979), "Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils", *Transactions of the 13th International Congress on Large Dams*, New Delhi, vol.2, 25-35.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Talbot, J.R. (1984), "Basic Properties of Sand and Gravel Filters", *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(6), 684-700.
- Silveira, A. (1965), "An Analysis of the Problem of Washing Through in Protective Filters", *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, vol.2, 551-555
- Silveira, A., De Lorena Pixoto, T., Nogueira, J.B. (1975), "On void-size distribution of granular materials", *Proceedings of the 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal.
- Thanikachalam, V., Sakthivadivel, R. (1974), "Rational Design Criteria for Protective Filters", *Canadian Geotechnical Journal*, 11(2), 309-314.
- Terzaghi, K. (1943), "Theoretical soil mechanics", John Wiley & Sons, New York.
- Thiel, R.S. (1998), "Design Methodology for a Gas Pressure Relief Layer Below a Geomembrane Landfill Cover to Improve Slope Stability", *Geosynthetics International*, 5(6), 589-617.

- U.S. Army Corps of Engineers (2000), “Design and Construction of Levees”, Department of the Army, Washington.
- Wan, C.F., Fell, R. (2008), “Assessing the Potential of Internal Instability and Suffusion in Embankment Dams and Their Foundations”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(3), 401-407.
- Watts, K.S., Charles, J.A., Blaken, N.J.R. (2002), “Settlement of landfills: measurements and their significance”, *Waste 2002, Integrated Waste Management and Pollution Control: Research, Policy and Practice*, 673-682.
- Yu, Y., Rowe, R.K. (2013), “Effect of grain size on service life of MSW landfill drainage systems”, *Canadian Geotechnical Journal*, 50(1), 1-14.